INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



ASTRONOMIA ISLAMICA

Abril 1986

450 Ptas.
(IVA incluido)

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 115
Abril 1986



EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

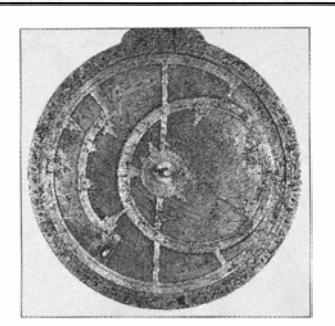
Santiago Torres Martínez: *La célula T y su receptor*; Ramón Carbó Carré: *Reacciones quimiocuánticas en la región del frío intenso*; José Miguel Calvo Hernández y Juan Vilchez Bartolomé: *Imágenes sísmicas de los límites de placa*; Raquel Ancín Viguiristi: *El corazón, glándula endocrina*; Manuel Crespo Veigas: *Filogenia de las aves mediante comparación de ADN*; Alfredo J. Morales Padrón: *Técnicas de la cantería inca*; Julio Samsó Moya: *Astronomía islámica*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Ciencia y sociedad:

Rolf Tarrach

Libros:

José María Peiró, Andrés Pulgar, Xavier Niell, Pilar Sesma y José Manuel Sánchez Ron



PORTADA

La fotografía de portada muestra un astrolabio, un mapa del cielo de latón en dos dimensiones que fue muy utilizado por los astrónomos musulmanes (véase "Astronomía islámica" por Owen Gingerich en este número). Los índices que aparecen en la red abierta (la araña) indican las posiciones de las estrellas principales. Cuando se hace girar la araña en torno al pivote central se logra simular el movimiento diario aparente de las estrellas alrededor del polo norte celeste. Por otra parte, gracias a la ayuda de un sistema de coordenadas celestes que aparece grabado sobre la lámina sólida situada debajo de la araña, puede determinarse la posición de las estrellas con respecto al horizonte y al meridiano. Entre las aplicaciones del astrolabio se encuentra la determinación de la hora tanto de día como de noche. Este artilugio fue inventado por los antiguos griegos pero el ejemplar más antiguo que conservamos fechado es el que aparece reproducido aquí: fue construido por un musulmán llamado Nastulus en el año 927-928 de nuestra era y se encuentra, hoy en día, en el Museo Nacional de Kuwait.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4400 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 33 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.º, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Fotografía de la portada cortesía de la Colección Al-Sabah, Museo Nacional de Kuwait

Página	Fuente
9	Luis López Bellido
10-15	Luis López Bellido y Ricardo Génova
17	Andrew G. Farr, Facultad de Medicina, Universidad de Washington
18-25	Bunji Tagawa
29	Paul Weiner, Universidad Rutgers
30-33	Sergei Anosov e Ilil Arbel
34	Aleksandr Chumichov
42-43	John W. Ladd, Observatorio Geológico Lamont-Doherty (*arriba*); George Retseck (*abajo*)
44-45	George Retseck
46-47	Lucien Montadert, Instituto Francés del Petróleo (*arriba*); George Retseck (*abajo*)
48-49	John C. Mutter, Observatorio Geológico Lamont-Doherty
50	George Retseck
51	Observatorio Geológico Lamont-Doherty
56	Andrew Christie
57	Marc Cantin
58	Kevin A. Somerville (*arriba*), Andrew Christie (*abajo*)
59-60	Kevin A. Somerville
61	Andrew Christie
65-74	Patricia J. Wynne
77	Jean McMann (*arriba*); Jean-Pierre Protzen, Universidad de California en Berkeley (*abajo*)
78-80	Michael Goodman
82-83	Jean-Pierre Protzen, Universidad de California en Berkeley
84	Michael Goodman
87	Owen Gingerich
88-89	Hank Iken, Walken Graphics
90	Thomas Photos, Oxford
91-93	Hank Iken, Walter Graphics
94	Biblioteca Bodleyana de Oxford
99-101	Ilil Arbel
105-108	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

LUIS LOPEZ BELLIDO ("El altramuz") regenta la cátedra de cultivos herbáceos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos de la Universidad de Córdoba. Durante nueve años trabajó en el Ministerio español de Agricultura en la ejecución de programas de inventarios, seguimiento y ordenación de cultivos. Autor de numerosas investigaciones sobre cultivos herbáceos característicos del Valle del Guadalquivir, desde 1979 coordina el cumplimiento de distintos programas sobre agronomía de leguminosas autóctonas, especialmente el altramuz. En 1982 se le eligió secretario general de la Asociación Internacional del Lupino.

PHILIPPA MARRACK y JOHN KAPPLER ("La célula *T* y su receptor") se hallan adscritos al Centro Nacional Judío de Inmunología y Medicina Respiratoria, en Denver. Marido y mujer, investigan también en equipo. El da clases de microbiología e inmunología en el Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Colorado; ella, de bioquímica, biofísica y genética. Marrack se formó en la Universidad de Cambridge, donde se doctoró, en 1970, con una tesis realizada en el Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas. Kappler procede de la Universidad de Lehigh, si bien obtuvo su doctorado por la de Brandeis el mismo año que su mujer. Recibieron sendas becas postdoctorales para ampliar estudios en la Universidad de California en San Diego. De aquí pasaron a la Facultad de Medicina de la Universidad de Rochester y, luego, a Colorado. Kappler llegó a la inmunología desde el campo de la diferenciación celular; Marrack prefiere los aspectos genéticos.

VITALII I. GOLDANSKII ("Reacciones quimiocuánticas en la región del frío intenso") encabeza uno de los departamentos del Instituto de Quimiofísica de Moscú. Se graduó en 1944 en la Universidad estatal de Moscú; tres años más tarde recibía la licenciatura en química y, en 1954 se doctoraba en física y exactas. Goldanskii ha escrito varios libros dedicados al efecto Mössbauer, los principios generales de los láseres de rayos gamma, aplicaciones químicas de la aniquilación de los positrones y propiedades de los núcleos más allá de los límites de la estabilidad beta.

JOHN C. MUTTER ("Imágenes sísmicas de los límites de placa"), sismólogo marino, comparte su tarea docente en la Universidad de Columbia con trabajos de investigación en el Observatorio de Lamont-Doherty. Se licenció en física y exactas en la Universidad de Melbourne de su Australia natal, prosiguiendo su formación en la de Sidney. Comenzó a colaborar en Lamont-Doherty a raíz de un programa conjunto entre éste y la Oficina Australiana de Recursos. La Universidad de Columbia le concedió el título de doctor.

MARC CANTIN y JACQUES GENEST ("El corazón, glándula endocrina") trabajan juntos en el Instituto de Investigación Clínica de Montreal, en el que Cantin es director del laboratorio de biopatología y de un grupo multidisciplinario de investigación sobre hipertensión, y en el que Genest es consultor. Ambos enseñan medicina experimental en la Universidad McGill. Cantin da clases también de patología y, Genest, de medicina en la Universidad de Montreal. Cantin cursó la carrera en la Universidad de Laval, entre 1953 y 1958, y se doctoró en 1962 por la de Montreal. Pasó los tres años siguientes en la Universidad de Chicago. La Universidad de Montreal lo contrató en 1965; desde 1980 colabora con el Instituto de Investigación Clínica, y, desde 1983, con la Universidad McGill. Genest estudió también en la Universidad de Montreal. Trabajó en el Hospital Hôtel-Dieu de Montreal, en la Johns Hopkins, en la Universidad de Harvard y en el Instituto Rockefeller. Ha ejercido en el Hôtel-Dieu desde 1952. Entró en el claustro de profesores de la Universidad de Montreal en 1965, y, en el de McGill, en 1970.

CHARLES G. SIBLEY y JOHN E. AHLQUIST ("Filogenia de las aves mediante comparación de ADN") son, respectivamente, profesor de biología e investigador adjunto y docente de biología en la Universidad de Yale. Ambos están vinculados al museo Peabody de Historia Natural, de Yale, donde Sibley es conservador de aves y, Ahlquist, adjunto de investigación en ornitología. Sibley se doctoró en zoología por la Universidad de California en Berkeley en 1948, y trabajó en el San José State College y la Universidad de Cornell antes de trasladarse a Yale en 1965. En 1956 empezó a aplicar las técnicas bioquímicas de manipulación de ADN y proteínas al estudio de la sistemática y la filogenia de las aves. De 1970 a 1976, Sibley fue director del museo Peabody. Ahlquist se doctoró en Yale. Desde 1972 hasta 1977 fue conservador adjunto del museo Peabody. Ahlquist fue contratado por el museo en 1977 y se incorporó al profesorado del departamento de biología de Yale en 1981.

JEAN-PIERRE PROTZEN ("Técnicas de la cantería inca") dirige el departamento de arquitectura de la Universidad de California en Berkeley. Se graduó en 1954 por el Colegio Universitario San Miguel de Friburgo, Suiza, pasando a estudiar arquitectura en el Instituto Politécnico Suizo y después a la Universidad de Lausana, donde obtuvo su diploma en 1962. Entre 1956 y 1967 se dedicó a la construcción, especializándose en viviendas en serie. Una beca de la Fundación Nacional Suiza para la investigación científica le permitió trasladarse a Berkeley y estudiar problemas de procedimiento en la actuación de los diseñadores. Desde 1968, año en que ocupó su plaza en Berkeley, Protzen se ha dedicado casi exclusivamente a tratar de las teorías y métodos de diseño.

OWEN GINGERICH ("Astronomía islámica") divide su tiempo entre la investigación astrofísica en el Observatorio Astrofísico Smithsoniano de Cambridge y sus clases de astronomía e historia de la ciencia en la Universidad de Harvard, centro éste que le otorgó el título de doctor en 1962. De 1955 a 1958 enseñó astronomía y física en la Universidad Americana de Beirut, donde adquirió práctica en el dominio del calendario islámico.

Hace...

José M.ª López Piñero

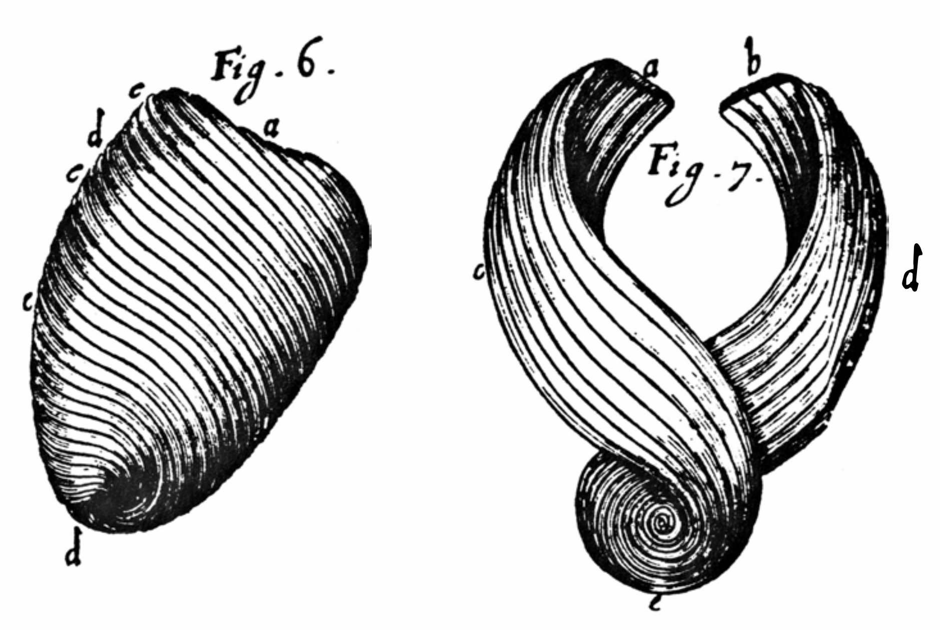
... trescientos años

Joan d'Alòs Serradora publicó su *Pharmacopea Cathalana sive Antidotarium Barcinonense.*

Nacido en Moià en 1617, Alòs estudió medicina en la Universidad de Barcelona, en la que tuvo como principal maestro a Jacint Andreu, seguidor del galenismo ortodoxo pero clínico muy sobresaliente, al que se debe, por ejemplo, una de las primeras descripciones del tétanos de los recién nacidos. El digno nivel que gracias a Andreu alcanzó la enseñanza médica barcelonesa en el campo de la patología y la clínica lo consiguió también Alòs en el terreno anatómico. Por Cardoner sabemos que el primer proyecto de construcción de un anfiteatro anatómico en Barcelona data de 1638, fecha en la que se reorganizó el plan de estudios de su Facultad de Medicina. Las circunstancias políticas y militares retrasaron su construcción, que no quedó concluida hasta 1675. Desde 1659 había quedado provista la cátedra correspondiente en la persona de Joan d'Alòs, cuyas demostraciones anatómicas fueron tan brillantes y concurridas que influyeron en la terminación de las instalaciones.

Más tarde, Alòs pasó a regentar las cátedras de aforismos y de botánica médica, ocupando por último la de prima durante casi un cuarto de siglo. Sólidamente instalado en los ambientes oficiales, desempeñó importantes cargos políticos y fue nombrado protomédico del Principado de Cataluña y de los Condados de Rosellón y de Cerdaña.

La primera publicación de Alòs fue una *Dissertatio* (1664) sobre los "trociscos viperinos" o carne de víbora empleada en la preparación de la tríaca, tema sobre el que mantuvo una polémica con el médico valenciano Miguel Vilar, al que dirigió un *Criticum apologema* (1665). En su condición de protomédico escribió, como hemos adelantado, la *Pharmacopea Cathalana, sive Antidotarium Barcinonense* (1686). A pesar de su título no se trata de una farmacopea propiamente dicha, como hace constar en su prólogo el propio Alòs, que la publicó por no haber editado ninguna durante el siglo el Colegio de Boticarios de Barcelona.



1. Alòs no solamente defendió la doctrina de la circulación de la sangre, sino que incorporó los avances anatómicos y fisiológicos relacionados con el corazón que se habían producido durante los tres cuartos de siglo transcurridos desde la aparición de la obra de Harvey. Esquema del miocardio procedente del Tractatus de corde *(1669), de Richard Lower, uno de los textos que más influyeron en su obra.*

La principal obra de Alòs es la titulada *De corde hominis disquisitio physiologico-anatomica* (1694), que constituye el estudio de mayor importancia que en la España del siglo XVII se dedicó al aparato cardiovascular.

Se ocupa en primer término de la anatomía del corazón, que expone incorporando los hallazgos más recientes. Con una orientación claramente moderna, desmiente las opiniones de los antiguos en problemas como la naturaleza de las fibras cardíacas y la unión de los vasos al corazón fetal.

La parte fisiológica del libro no es una mera defensa de la doctrina circulatoria, puesto que incorpora los complejos problemas planteados durante los tres cuartos de siglo transcurridos desde la aparición de la obra de William Harvey. Discute, por ello, extensamente, cuestiones como el origen de la sangre, las relaciones entre respiración y circulación, o la naturaleza de la contracción cardíaca, adoptando, en general, una actitud de compromiso entre los esquemas tradicionales y las nuevas interpretaciones. De tono mucho más moderno es la exposición de la doctrina circulatoria propiamente dicha. Alòs rechaza la teoría tradicional que consideraba al corazón como centro del calor innato y también la idea galénica del movimiento activo de las arterias, demostrando que la pulsación depende exclusivamente del impulso que la contracción cardíaca comunica a la sangre. Refuta los argumentos de los galenistas contrarios a la doctrina circulatoria, entre ellos los del británico James Primerose y el español Matías García.

Muy notable es también la parte terapéutica y patológica del tratado. Comienza por dar una excelente información acerca de dos novedades terapéuticas del momento: la administración intravenosa de medicamentos y la transfusión sanguínea. El interés por estas técnicas lo debe el médico catalán

2. *Entre las novedades que Alòs asimiló desde su postura ecléctica de base tradicional figuran las inyecciones endovenosas y la transfusión sanguínea:* (**a**) *figura de la* Chirurgia infusoria *(1667), de Johann Daniel Major, otro importante apoyo de la obra de Alòs.* (**b**) *Inyección endovenosa en el brazo y la pierna. Grabado de* Clysmatica nova *(1667), de Johann Sigismund Elsholtz.* (**c**) *Cánulas utilizadas para la transfusión sanguínea, según el* Tractatus de corde*, de Lower.*

a su buen conocimiento de la literatura médica reciente y, sobre todo, a Richard Lower, cuyo *Tractatus de corde* (1669) influye de modo evidente en toda su exposición. También dedica especial atención a las contribuciones de Johann Daniel Major y a su libro *Chirurgia infusoria* (1667), título que le sirve para rotular el capítulo que dedica a las técnicas de administración endovenosa de diferentes sustancias en los animales y en el hombre. En el consagrado a la transfusión sanguínea expone detenidamente las experiencias de Lower y resume las de Edmund King y Giovanni Riva.

Todavía más importante es la sección relativa a la anatomía patológica cardiovascular. Consiste en la reunión sistematizada de cerca de un centenar de protocolos de autopsia referentes a lesiones anatómicas del corazón y de los vasos. De modo semejante al *Sepulchretum* (1679) de Théophile Bonet, proceden en su mayor parte de obras del siglo XVII. Hay también algunos casos de autores del Renacimiento, siendo muy significativo que no se reproduzca ningún texto medieval y solamente tres breves referencias a clásicos antiguos. Las lesiones descritas corresponden a una observación seria y objetiva, ya que a lo pintoresco se concede una atención mucho menor que en el *Sepulchretum*. Alòs incluye, además, dos autopsias procedentes de su propia experiencia disectiva. He aquí el texto en el que expone una de ellas: "El día 6 de febrero de 1662, en esta ciudad de Barcelona, observé en el cadáver del R. P. Lloret, religioso carmelita, que el pulmón derecho estaba tenazmente adherido por todas partes a la pleura y al diafragma, estando por dentro casi corrompido, con gran cantidad de pus de diferentes tipos. El pulmón izquierdo, por el contrario, carecía de toda lesión manifiesta. El *corazón aparecía marchito y enflaquecido* sin ninguna grasa visible. Las venas y las arterias coronarias estaban distendidas

por sangre espesa y oscura. Por fuera estaba cubierto el corazón de muchísima materia viscosa y purulenta. El pericardio, bastante distendido, estaba repleto, en cambio, de abundante cantidad de un líquido acuoso turbio."

La contribución del catedrático barcelonés a la introducción en nuestro ambiente de importantes novedades científicas no cabe dudar que fue de auténtico relieve. Pero la riqueza de su información y la solvencia con que supo exponerla no deben hacer olvidar que Alòs no fue un partidario de la ciencia moderna, sino un ecléctico que se esforzó en encajar sus principales aportaciones sobre una base claramente tradicional. Ya hemos dicho que sus ideas fisiológicas son una hábil combinación de descubrimientos recientes y de doctrinas griegas. No obstante, donde con más claridad se denuncia el carácter radicalmente galénico de su pensamiento es en un capítulo de su obra titulado "Acerca de si el método curativo racional es alterado por el descubrimiento de la circulación de la sangre". La respuesta negativa a esta cuestión, diciendo que "lejos de alterarlo lo ilustra y perfecciona", fue ya considerada por Morejón y más recientemente por Izquierdo y Pi-Sunyer como prueba de la "modernidad" de Alòs. Basta leer el capítulo para comprobar, sin embargo, que lo que defiende es la compatibilidad de la doctrina circulatoria con la patología galénica tradicional, frente a los que "la niegan de plano como cosa nueva, inaudita, inútil e imposible, radicalmente opuesta a las hipótesis de los antiguos y alteradora de la medicina dogmática (galénica)". Para un *novator* auténtico como el joven y rebelde Juan de Cabriada, la doctrina de Harvey era "el sol de una nueva medicina", el resultado de un nuevo método de acercamiento a la naturaleza que suponía una completa revisión de las teorías patológicas clásicas. El maduro catedrático y protomédico barcelonés se empeña, por el contrario, en negarle esta trascendencia y en presentar la piedra angular de la biología y de la medicina modernas como un complemento aclaratorio de las doctrinas tradicionales.

Otra prueba de su eclecticismo es la defensa que hace de la perfecta compatibilidad de la técnica de la transfusión sanguínea con la medicina galénica. Para valorar la posición de Alòs conviene recordar las rígidas prohibiciones (1668-1678) que dicha técnica había merecido en Francia por presión de los galenistas, y que incluso Gaspar Bravo de Sobremonte –a pesar de su actitud "moderada"– había consagrado un escrito a atacarla. Es innegable que Alòs había llegado a la máxima apertura que frente a las novedades podía permitirse un galenista. Ambos niveles del tradicionalismo "moderado" serían denunciados, sin embargo, pocos años después por Diego Mateo Zapata. En su obra póstuma *El ocaso de las formas aristotélicas* afirma, refiriéndose al problema del origen de la sangre: "En vista de estas evidentes razones anatómicas, ¿quién no se admirará que a dos tan doctos médicos españoles como los doctores Bravo de Sobremonte y Alòs, admitiendo la circulación de la sangre, los impela su afecto galénico a insistir en que el hígado ha de sanguificar? Bravo lo defiende contra los peripatéticos y Alòs, para no desconsolar a ninguno, es de ambos partidos: afirma, con los aristotélicos y modernos, que el corazón, y con los galenistas, que el hígado."

El eclecticismo de Alòs ha de ser, además, valorado como el ejemplo más sobresaliente de la postura ante la modernidad vigente en la Barcelona médica de su tiempo. Lo encontramos también en Jaume Solá, prologuista del libro de Alòs y autor de una defensa de la circulación de la sangre que quedó manuscrita. También Solá era catedrático y había sido discípulo de Jacint Andreu. Como en el caso de Zaragoza, resulta necesario recordar la presencia en este ambiente de Juan Bautista Juanini, una de cuyas obras apareció con una entusiasta "aprobación" de Joan d'Alòs. A diferencia de lo sucedido en la capital aragonesa y en otras ciudades de la península, en Barcelona no se produjo un choque abierto entre los *novatores* y los defensores de la ciencia tradicional que dominaban los cargos y las instituciones. Fueron hombres como Alòs y también como Solá, que ocupaban los principales puestos oficiales, las cabezas de una vía media. Un singular ejemplo histórico del llamado "pactismo" catalán.

ERRATUM

En la primera columna, segundo punto y aparte, de la página 16 del número 114, el punto y seguido que empieza "Por ejemplo, si existe...", debe sustituirse enteramente por este otro: Por ejemplo, si hay una sola variable x, se tiene $x_{t+1} = f(x_t)$, donde $f(x)$ es una función conocida.

El altramuz

Cultivado desde muy antiguo en la cuenca mediterránea y en los Andes, la Comunidad Económica Europea acaba de introducir el altramuz dentro de su política de protección de plantas productoras de proteínas

Luis López Bellido

El déficit de producción de proteínas en el mundo representa uno de los factores más destacados de la crisis de alimentos que actualmente se padece y la principal causa de las diferencias nutricionales entre las distintas zonas del mundo. Los países en vías de desarrollo se encuentran en condiciones de inferioridad para superar dicha crisis, con unas posibilidades de crecimiento mermadas. En los últimos tiempos han surgido diferentes modelos relativos a la estrategia de utilización de los recursos alimenticios disponibles. Plantéase, en general, si éstos deben canalizarse prioritariamente hacia la especie humana o bien hacia la producción animal que, finalmente, sería destinada al hombre. En la situación actual de escasez, la ganadería de los países desarrollados consume alimentos de los que carece, con frecuencia, la población humana de otras áreas, situación que reviste caracteres más alarmantes en el caso de las proteínas. Existen, en efecto, grandes desigualdades en el consumo de proteínas en el mundo, pues frente a la media de 65 gramos por persona y día de proteína animal consumida en Europa occidental, se encuentran cifras inferiores a 10 gramos por persona y día en países pobres.

El valor biológico de las proteínas animales es, hoy por hoy, netamente superior al de las proteínas vegetales. Y no parece que, de momento, se pueda variar el sistema actual de alimentación de la población humana. Sin embargo, algunos prevén, en un futuro no muy lejano, que ciertas áreas del mundo de clima árido tendrán que tornar su mirada hacia el consumo de proteínas vegetales, dado el encarecimiento y la dificultad de conseguirlas por vía animal. Muchos países desarrollados, de Europa especialmente, se abastecen para sostener su producción animal de importaciones de proteínas de soja cada vez más costosas y difíciles; sobre todo a partir de la crisis del mercado mundial acaecida a finales del año 1973. Esta situación de crisis prolongada, que ha adquirido un carácter estructural, y el crecimiento de la demanda alimentaria exigen incrementar la producción de alimentos con todos los medios y recursos disponibles.

En tales circunstancias se ha despertado un gran interés por otras leguminosas-grano, como alternativa de sustitución de la soja, y se han puesto en marcha numerosos estudios e investigaciones en Europa y otras regiones con el fin de obtener nuevas variedades de altos rendimientos y mejor calidad nutricional. Las leguminosas constituyen un numeroso grupo de plantas ampliamente distribuidas por el mundo, algunas de las cuales son cultivadas desde muy antiguo. Presentan la peculiaridad de ser mejoradoras de la fertilidad del suelo y ahorradoras de energía, al fijar el nitrógeno atmosférico por la simbiosis que realizan con las bacterias del género *Rhizobium*. Sus semillas poseen un alto contenido en proteínas y se utilizan tanto en la alimentación humana como en la animal; determinadas especies también poseen un elevado contenido en aceite.

Con el desarrollo tecnológico de la agricultura, las leguminosas cultivadas han sufrido un descenso, debido a la falta de rendimientos, a la escasez de variedades mejoradas y a las dificultades de mecanización. En virtud de esta reducción de superficie, gran cantidad de tierras han quedado vacías o han sido ocupadas sistemáticamente por un mismo cultivo. Ello no ha beneficiado en absoluto a los sistemas de cultivo, que se han visto, en gran parte, privados del papel mejorador de la fertilidad del suelo que tiene la leguminosa. Se ha dado origen, con los cambios tecnológicos generados por la utilización de la energía fósil, en los países desarrollados, a una agricultura altamente especializada, pero a la vez separada de la naturaleza y derrochadora de las fuentes irrenovables de materias primas y energía. Ello puede llevar, en un futuro no lejano, a un callejón sin salida y a un sistema de producción agrícola poco idóneo para ser adaptado a los países en vías de desarrollo. En este contexto las leguminosas constituyen una fuente de proteínas barata, de grandes posibilidades futuras y que pueden ser aprovechadas bajo diversas formas.

El altramuz está considerado como una de las leguminosas de mayor potencialidad, pues presenta en estado silvestre mayor contenido en proteínas que ninguna otra planta, adaptándose a terrenos pobres y secos. Por ello se le ha denominado la "nueva soja" de las zonas áridas y se han incrementado las investigaciones encaminadas a mejorar sus cualidades nutritivas y a fomentar su cultivo en numerosos países de Europa, Sudamérica y en Australia.

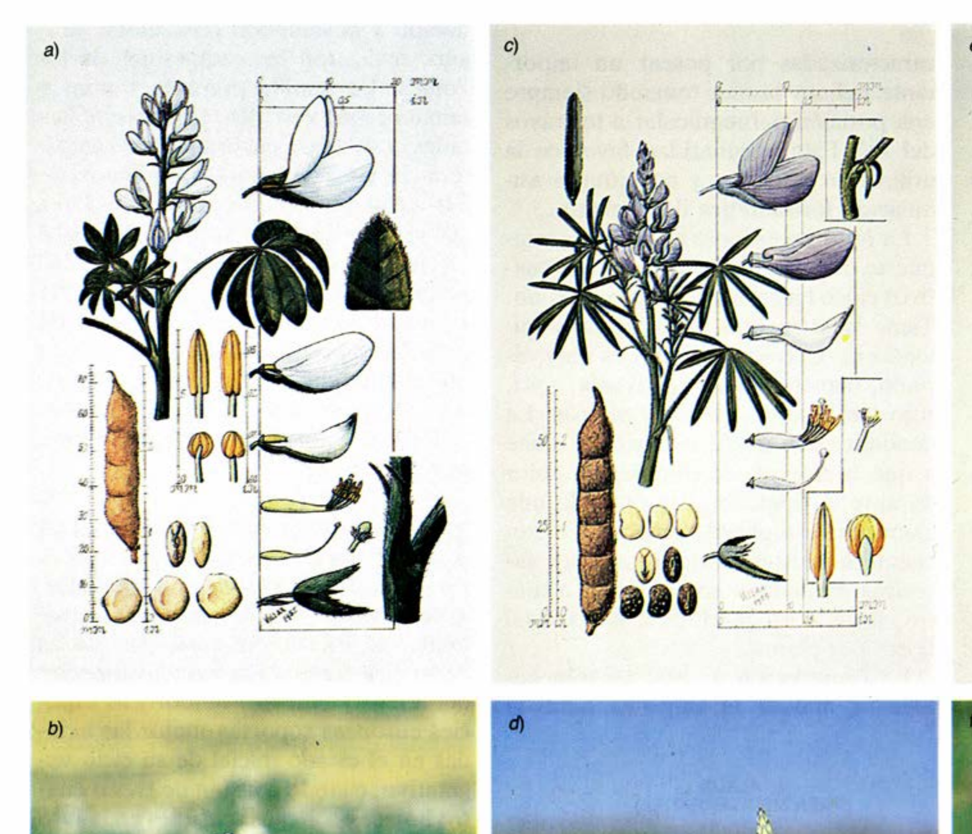
El altramuz pertenece a diferentes especies del género *Lupinus*, nombre que deriva del latín *lupus*, que significa lobo. En castellano recibe diferentes denominaciones comunes: altramuz, lupino, chocho y tarwi, derivado éste del quechua. El origen del altramuz se sitúa principalmente en dos centros: el mediterráneo y el americano, más concretamente en el oeste de Norteamérica y Sudamérica, exceptuando las húmedas llanuras tropicales de la cuenca del Amazonas. Es un género amplio y complejo que ya fue incluido por Linneo en su taxonomía, donde describió seis especies: *Lupinus perennis, Lupinus albus, Lupinus varius, Lupinus hirsutus, Lupinus angustifolius* y *Lupinus luteus*. Dichas especies son todas anuales, oriundas del Mediterráneo, excepto *L. perennis*, que es plurianual y oriunda de Norteamérica. A *L. albus* se la considera la especie tipo del género.

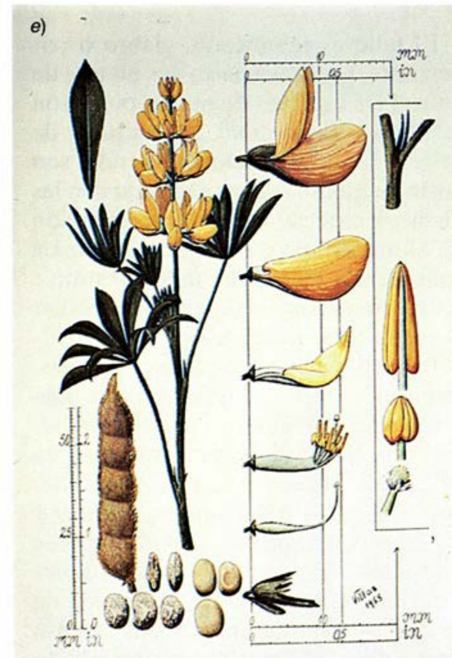
De las seis especies descritas por Lin-

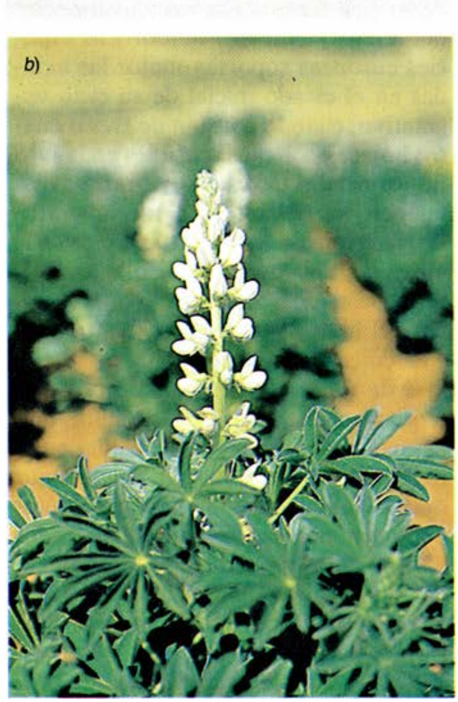
neo se ha pasado en la actualidad a unas 1500 o 1700 para todo el género, aunque el número de taxones parece ser sólo de unos 600, con el 40 o el 50 por ciento de ellos por debajo del taxón especie.

De la región mediterránea proceden una docena de especies silvestres, de las que se mejoraron las especies cultivadas: *L. albus, L. luteus* y *L. angustifolius*. En la región americana existe mayor diversidad de especies, que guardan, por lo general, una mayor relación citogenética que las especies europeas. De ahí que exista la posibilidad de hibridaciones interespecíficas entre las mismas. *L. mutabilis* es la especie que se utiliza en la agricultura del Nuevo Mundo. Esta tiene, al igual que la mayoría de las especies americanas, una dotación cromosómica $2n = 48$ con número básico igual a seis; mientras que en *L. albus* es $2n = 50$, en *L. angustifolius* $2n = 40$ y en *L. luteus* $2n = 52$. *Lupinus mutabilis* presenta una extraordinaria variabilidad genética, que se muestra en una amplia manifestación genotípica y en un alto potencial genético. (Con la expresión $2n$ se indica que el núcleo celular de la especie es diploide, es decir, tiene doble juego de cromosomas.)

Entre las especies de altramuz las hay anuales y perennes, de tipo herbáceo y arbustivo, con porte erecto, semierecto o decumbente. El sistema radicular es pivotante y profundo, con diferencia entre especies en cuanto a su longitud, siendo en *L. albus* más corto. Su potente desarrollo explica, en gran parte, la resistencia de la planta a la sequía, además de su capacidad de absorber del suelo elementos minerales poco solubles.











1. TRES ESPECIES DE ALTRAMUZ, o lupino: *Lupinus albus*, *L. angustifolius* y *L. luteus*, izquierda, centro y y derecha, respectivamente. Junto a las características botánicas, ilustradas por Villax, se han dibujado las inflorescencias de cada especie. Los tres altramuces de la figura –cuyo nombre vulgar responde al de blanco, azul y amarillo– proceden de la región mediterránea y son las tres especies domesticadas que más se cultivan del género. El vegetal está considerado como una leguminosa de extraordinaria potencialidad, pues presenta en estado silvestre mayor contenido en proteínas que ninguna otra planta.

CULTIVO INICIAL (1978)	RENDIMIENTO 1978 (TON/HA)	RENDIMIENTO DE TRIGO (TON/HA)	
		1979	1980
TRIGO	3,98	3,94	3,90
COLZA	1,95	4,61	4,07
TREBOL SUBTERRANEO	–	4,70	3,60
ALTRAMUZ CV. UNIHARVEST	2,47	5,36	4,67
ALTRAMUZ CV. HAMBURG	4,22	4,92	4,41
HABAS	0,27	4,26	3,95
GUISANTES	1,82	4,83	3,43
GARBANZOS	0,10	4,54	4,07
ALMORTAS	1,47	4,89	4,28

2. RENDIMIENTO DE TRIGO en dos años consecutivos, precediéndole diferentes cultivos, en un ensayo realizado en Australia. El rendimiento se expresa en toneladas métricas por hectárea. El primer año (1979), el rendimiento de trigo se incrementó después de todas las leguminosas, mientras que en el segundo sólo en las parcelas que fueron cultivadas de altramuz se incrementó, significativamente, el rendimiento del trigo.

El tallo es ramificado, glabro o pubescente, y alcanza hasta dos metros de altura; las especies de mayor porte son *L. albus* y *L. mutabilis*, en su lugar de origen. Las ramificaciones laterales son hasta de quinto orden, variando con las distintas especies el punto de inserción en altura de dichas ramificaciones. La consistencia leñosa del tallo constituye un inconveniente a la hora de efectuar la recolección mecánica.

Las hojas son compuestas, digitadas, insertándose en un largo peciolo. Los foliolos son ovoides o lanceolados, según especies, y su número varía de 5 a 12, siendo de 7 a 9 lo más frecuente. Son glabros o pubescentes, según las especies, variando con ellas el grado de pilosidad. En *L. mutabilis* los foliolos son siempre glabros. La coloración de las hojas varía desde el verde intenso de *L. albus* al amarillo verdoso de *L. mutabilis*. Las hojas del altramuz están caracterizadas por poseer un importante heliotropismo, tomando siempre una posición perpendicular a los rayos del sol. Esta peculiaridad favorece la utilización de la luz y aumenta la asimilación fotosintética de la planta.

La inflorescencia es en racimo, compuesto de numerosas flores, desde cuatro o cinco hasta 20 o 30 como máximo. Tiene la estructura típica de las papilonáceas. El color de la flor es muy variado: blanco, amarillo, naranja, rosa, rojo, azul, verde, violeta y marrón. La denominación de *L. mutabilis* se debe a que la flor puede cambiar de color durante la floración, presentando una gama muy amplia de colores. Es frecuente la existencia de floraciones sucesivas, hasta un número de tres o cuatro, llegando a producirse hasta 1000 flores por planta.

La fecundación es básicamente autógama, aunque la alogamia también existe; una y otra dependen de las diferentes especies y de las condiciones climáticas de cada zona. Es frecuente la polinización cruzada, provocada por insectos, que dificulta el mantenimiento del carácter dulce en los altramuces cultivados en el curso de multiplicaciones sucesivas.

Cada vaina puede contener de dos a nueve semillas; el número más frecuente está entre tres y seis. La dehiscencia de las vainas es un carácter propio de las especies silvestres, como método de reproducción. Sin embargo, curiosamente, no existe en *L. mutabilis*, donde la indehiscencia es absoluta, debido a la selección que, desde antiguo, realizaron los campesinos de los Andes. La semilla presenta formas y tamaños muy variados: esféricas, aplastadas, ovaladas, cuadrangulares, etcétera. El peso de las 1000 semillas es de 245 a 600 gramos en *L. albus*, de 130 a 200 gramos en *L. angustifolius*, de 80 a 180 gramos en *L. luteus* y de 123 a 340 gramos en *L. mutabilis*. La semilla de *L. mutabilis* es la de mayor tamaño de todas las especies del Nuevo Mundo, lo que testimonia la antigüedad de su cultivo al igual que el carácter indehiscente y el color blanco del grano, que es recesivo.

El altramuz es una planta de clima moderado con exigencias térmicas variables, según especies y variedades. Tolera hasta −9 °C, aunque la sensibilidad al frío difiere según las etapas de su ciclo vegetativo para las especies del Viejo y Nuevo Mundo. Las especies europeas soportan mejor las heladas en el estado inicial de su ciclo vegetativo, cuando constan de tres o cuatro hojas, y son más sensibles en la fase de formación de vainas y granos, que pueden ser destruidos con temperaturas inferiores a −4 °C. *Lupinus mutabilis* se cultiva en Perú y Bolivia en alturas hasta de 4000 metros sobre el nivel del mar, siendo susceptible al frío cuando está en fase de planta joven (en fase de roseta), mientras que es resistente al mismo en el estado adulto, que es cuando tienen lugar las heladas en la región de los Andes. El crecimiento óptimo del altramuz tiene lugar a temperaturas diurnas comprendidas entre 15 y 25 °C; temperaturas superiores a 28 °C entorpecen dicho crecimiento.

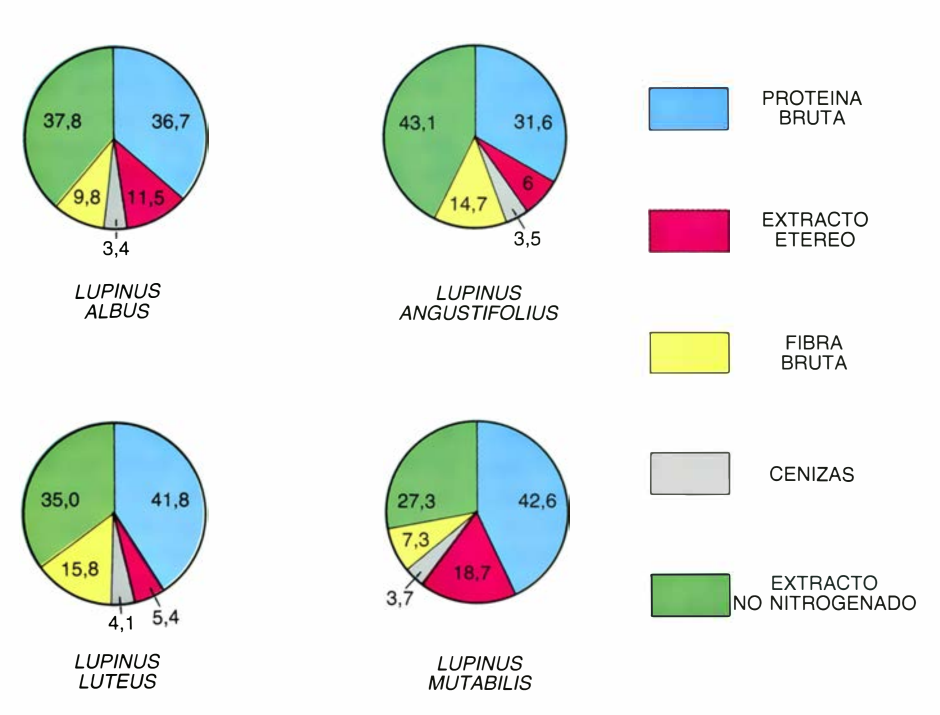
Todas las especies tienen una utilización de la radiación solar óptima, dada la gran superficie foliar que presentan, superior a la de numerosas plantas cultivadas. No está suficientemente constrastada la influencia de la duración del día en el crecimiento y de-

L. MUTABILIS (AREA ANDINA) — L. ALBUS (AREA MEDITERRANEA)

3. CRECIMIENTO de *Lupinus mutabilis* y *L. albus* en sus zonas de origen. El ciclo de *L. mutabilis* es más largo, las lluvias se concentran en el período de máximo crecimiento y las temperaturas bajas inciden, sobre todo, en la última fase de desarrollo; la siembra se realiza en primavera. Por su parte, *L. albus* presenta un ciclo más corto, se siembra en otoño y las temperaturas bajas inciden al comienzo del crecimiento.

sarrollo de las diferentes especies de lupino, aunque parecen ser especies de día largo. Los días cortos tienden a ralentizar el crecimiento y producir una diferenciación floral retardada.

El altramuz se adapta a una gran gama de suelos, aunque presentan limitación los caracterizados por un alto contenido en cal, que están asociados con valores elevados de *p*H. En estas condiciones aparecen fenómenos de clorosis y problemas en el crecimiento. Sus necesidades de agua son altas, por su elevada superficie foliar, que demanda una alta evapotranspiración en presencia de fuerte insolación y viento. Ello no está reñido con la resistencia a la sequía, que es un rasgo derivado de la profundidad de su sistema radicular. Son necesarios, por lo general, niveles superiores a los 350 milímetros de lluvia durante su ciclo para obtener rendimientos adecuados.



4. COMPOSICION MEDIA DE LAS SEMILLAS en las especies cultivadas de lupino, en porcentajes de materia seca. El componente más importante del altramuz es la proteína, que varía en las distintas especies entre valores aproximados del 30 al 50 por ciento. La grasa varía, a su vez, entre el 5 y el 19 por ciento.

El componente más importante del altramuz es, sin duda, la proteína, que confiere gran valor a la semilla, tanto para la alimentación humana como animal. También hay que considerar en algunas especies el contenido en aceite, y en todas el nivel de alcaloides, como sustancias antinutricionales, que dificultan y limitan la utilización directa en la alimentación.

El contenido en proteínas varía en las distintas especies entre valores aproximados del 30 al 50 por ciento. Las especies cultivadas de más alto contenido son *L. mutabilis* y *L. luteus*, seguidas de *L. albus* y después por *L. angustifolius*. Existe gran variabilidad en las proteínas de *L. mutabilis*: del 37 al 50 por ciento. *L. albus* alcanza en algunas líneas el 40 por ciento. Es necesario aclarar que dicho porcentaje de proteínas se obtiene aplicando el factor de conversión de 6,25 que multiplica al contenido total de nitrógeno. Algunos opinan que la aplicación de este coeficiente puede constituir una sobreestimación del contenido real de proteínas, al existir en el altramuz un elevado porcentaje de nitrógeno no proteico, sobre todo cuando el nivel de alcaloides es alto. (Un gramo de alcaloides equivale a 0,706 gramos de proteína.)

La composición en aminoácidos es rica en lisina y pobre en aminoácidos azufrados; en estos últimos resulta ser limitante al igual que en la inmensa mayoría de las leguminosas. En algunas especies, así en *L. albus*, existe también déficit de lisina.

La calidad biológica de la proteína medida por el PER (relación de eficiencia proteica) es baja, tanto en *L. mutabilis* como en *L. albus*. Dicho valor mejora en la semilla de *L. albus*, puesto que la deficiencia en aminoácidos azufrados es menor en esta especie. Mediante la adición de metionina se puede mejorar notablemente la calidad proteica del altramuz y, cuando esto sucede, *L. mutabilis* supera a *L. albus*, puesto que en éste la lisina reduce el PER al ser el segundo aminoácido limitante. (El procesado tecnológico de la semilla puede acarrear una considerable modificación de la calidad proteica, ya que el tratamiento alcalino para la producción de aislado proteico arrastra los aminoácidos azufrados limitantes, principalmente la metionina, reduciéndose drásticamente el valor PER. Esta desventaja puede compensarse mediante la suplementación con metionina. La cocción apenas mejora la calidad proteica, al no tener importancia las sustancias antinutritivas termolábiles; además, la digestibilidad de la proteína de la semilla cruda suele resultar bastante alta, pues alcanza más del 80 por ciento. La mezcla con otros alimentos mejora la calidad proteica del lupino, llegando a igualar ésta a la de la caseína.)

Mientras que en las especies *L. luteus* y *L. angustifolius* el porcentaje de grasa apenas alcanza el 5 por ciento, en *L. albus* y *L. mutabilis* dicho porcentaje es más importante, considerándose ambas como especies potencialmente oleaginosas. El promedio graso de éstas se sitúa en el 11 por ciento y el 19 por ciento, respectivamente. En los últimos años se han realizado grandes progresos en lo referente al contenido en aceite de ambas especies, habiéndose obtenido líneas de *L. albus* con un 18 por ciento y de *L. mutabilis* con un 25 por ciento de grasa. La composición en ácidos grasos de esta última resulta ser intermedia entre el aceite de cacahuete y el aceite de soja. Anotemos de paso que el bajo contenido en ácido linoleico de *L. mutabilis* comparado con *L. albus* permite una gran estabilidad del aceite. *L. albus* tiene pequeñas cantidades de ácido erucico, que es tóxico, del que carece la especie anterior.

El aceite de altramuz es típico de semillas, siendo su contenido en tocoferol mayor que el del aceite de girasol, soja y germen de maíz. El coeficiente *P/S* (relación entre ácidos grasos poliinsaturados y ácidos grasos saturados) está por encima del mínimo valor recomendado de 1,8.

En todas las semillas de leguminosas hay sustancias antinutritivas, que rebajan considerablemente su valor alimentario. En el altramuz ocupan el primer lugar los alcaloides quinolizidínicos, que son tóxicos y amargos, y constituyen el principal obstáculo para el aprovechamiento en alimentación animal de la semilla y también de la planta. Los alcaloides pertenecen al grupo de las lupininas, que abarca, entre otros, la lupinina, lupanina, esparteína e hidroxilupanina. La esparteína y la lupanina son los alcaloides más tó-

xicos, aunque existe diversidad de información sobre su grado de toxicidad, que suele cifrarse entre 11 y 46 miligramos por kilogramo de peso humano como dosis letal para el consumo.

Las hemaglutininas, otra de las sustancias antinutritivas, tienen poca importancia en el altramuz, que muestra una mínima actividad hemaglutinante, diez veces menor que la soja y mil veces menor que la judía. Cuando las semillas reciben un tratamiento térmico antes de ser consumidas, no se observa actividad hemaglutinante en el producto final, quedando destruidas todas las lectinas. Los inhibidores de la tripsina tampoco tienen actividad destacable en el altramuz, a diferencia de otras leguminosas. En *L. mutabilis* se observa una actividad de tripsina del nivel de 1,16 UIT/ml (unidad inhibidora de tripsina por mililitro) en comparación con la soja que tiene 30,1 UIT/ml. Los glucósidos cianogénicos también están presentes en pequeñas cantidades en el altramuz; su concentración es similar a la de la soja y está muy por debajo de la máxima cantidad permitida (20 miligramos de ácido cianhídrico por cada 100 gramos).

Además de las proteínas, las grasas y los alcaloides, hallamos en el altramuz otras sustancias nutritivas: sales minerales y las denominadas materias extractivas no nitrogenadas.

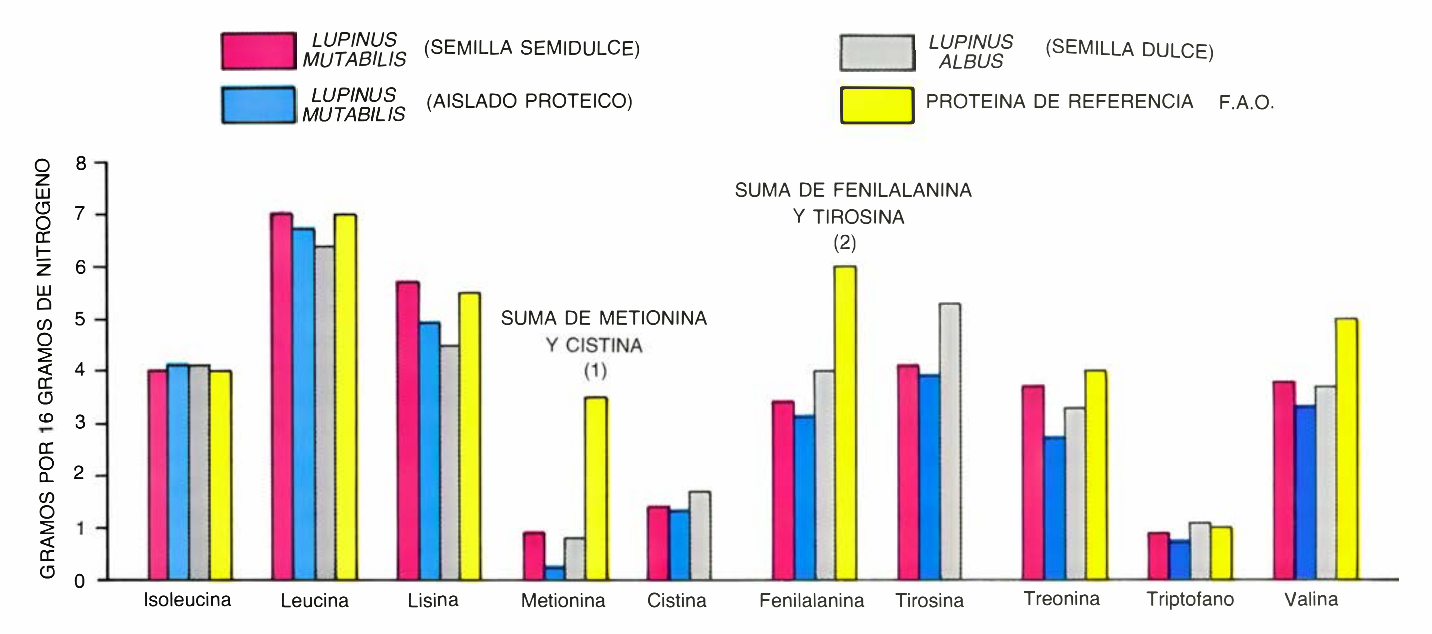
El contenido en hidratos de carbono varía entre el 20 y el 30 por ciento. Su principal componente, la celulosa, puede superar el 10 por ciento en el altramuz de grano pequeño, debido a la elevada proporción de su cubierta con relación al volumen, proporción que es difícil reducir, incluso con programas de selección genética. Sin embargo, en *L. albus*, con semilla de mayor tamaño, sí es posible reducir la proporción de cubierta seminal, en la que principalmente se encuentra esta celulosa, a través de mejora genética.

La semilla contiene, además, alrededor de un 2 por ciento de ácido fosfórico, 1 por ciento de potasio, óxido de magnesio, óxido de calcio y elementos traza como aluminio, boro, hierro, manganeso, cinc y cobre. En el altramuz se encuentran cantidades significativas de vitamina *A*, bajo la forma de β-caroteno, y, también, niacina, tiamina y, sobre todo, colina.

Todas las especies de altramuz, como ya se ha dicho, poseen un alto contenido en proteínas. Sin embargo, dentro de las especies cultivadas, pueden distinguirse tres tipos, en relación con su contenido en grasas y alcaloides. Constituyen el tipo primero aquellos altramuces cuyo contenido en grasa es inferior al 15 por ciento y al 0,05 por ciento en alcaloides. Forman el tipo segundo las especies que presentan la misma concentración lipídica que los anteriores, pero cuyo contenido en alcaloides se cifra por encima del 0,2 por ciento. El tercer tipo lo integran altramuces con un valor superior al 15 por ciento en contenido de grasa y por encima también del 0,2 por ciento en su fracción alcaloide.

La semilla verde del tipo primero puede destinarse al consumo humano. Su harina, obtenida a partir de semillas secas, puede ser empleada tanto para alimentación animal como humana a bajo coste de procesamiento. Presenta la dificultad de enranciamiento por la poca estabilidad del aceite que contiene. El tipo segundo es más difícil de utilizar en forma directa, debido a su amargor. Por su bajo contenido en grasa no permite una extracción rentable. En el tipo tercero la extracción del aceite resulta económica, aunque presenta el inconveniente del amargor de la torta residual, para cuya eliminación debería sufrir un costoso proceso. En este último caso la mejor solución se obtiene realizando una extracción combinada de aceites y alcaloides amargos, sistema que aún se encuentra en fase de experimentación. La harina de altramuz, dulce o desamargada, puede emplearse como sustitutiva de la soja en todos los casos: fabricación de pan, repostería, pastas, salchichas, sustitutivo de la carne y alimentación infantil.

Para que el altramuz entre en la dieta de rumiantes y aves, sólo basta una reducción del nivel total de alcaloides hasta el 0,4-0,6 por ciento. Pero en cerdos y seres humanos la harina no debe sobrepasar el 0,02 por ciento de alcaloides. Desde hace milenios los alcaloides se han extraído del altramuz, tanto en la zona mediterránea como en la andina, mediante el lavado de la semilla. El desamargado consiste, fundamentalmente, en un proceso de cocción, donde se destruye la viabilidad de



5. COMPOSICION EN AMINOACIDOS ESENCIALES del lupino. La calidad biológica de la proteína medida por por PER (relación de eficiencia proteica) es baja tanto en *L. mutabilis* como en *L. albus*. Dicho valor mejora en la semilla de *L. albus* porque la deficiencia en aminoácidos azufrados es menor en ésta. Mediante la adición de metionina se puede mejorar notablemente la calidad proteica del altramuz y, cuando esto sucede, *L. mutabilis* supera a *L. albus*.

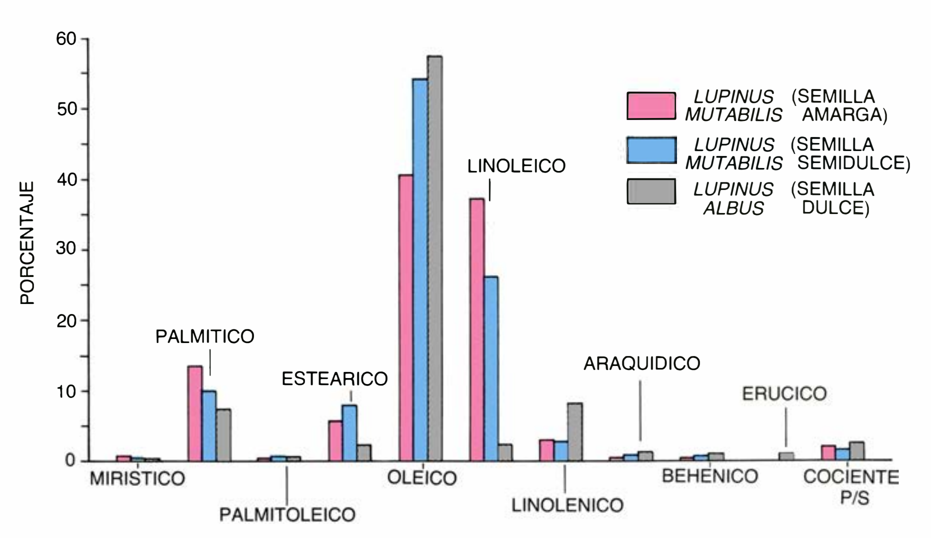
la semilla y enzimas indeseables, tales como las lipasas, que favorecen la autooxidación de las grasas. Con posterioridad se realiza un remojo en agua corriente durante varios días para lavar los alcaloides, aunque este proceso de lavado puede acortarse añadiendo cenizas de plantas durante la cocción, como ha sido práctica habitual en la zona andina.

El porcentaje elevado de grasa de *L. mutabilis* permite extraer el aceite comestible. Dicha extracción puede hacerse con hexano, refinándose después el aceite, donde se eliminan los alcaloides residuales que contiene mediante un lavado ácido adicional, quedando sólo un contenido de alcaloides de 0,6-0,8 partes por millón.

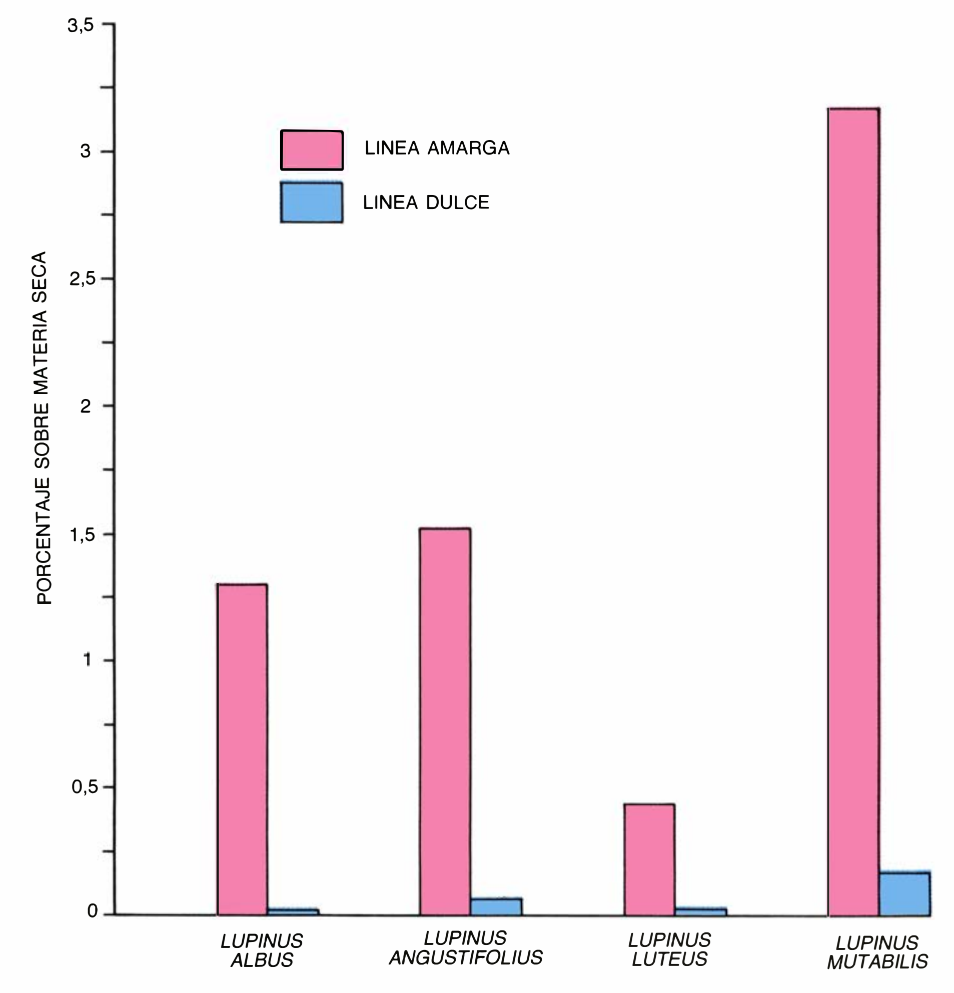
La torta se desamarga mediante una extracción con alcohol, sistema análogo al utilizado para la producción de concentrados proteicos de soja. El desamargado resulta más económico si se pasan los alcaloides con el aceite durante la extracción, para ser eliminados después mediante un lavado en el transcurso de la refinación. El etanol caliente y el isopropanol son solventes apropiados para la extracción simultánea de grasas y alcaloides.

La utilización de altramuces dulces en la dieta de animales, cuyos primeros ensayos se remontan a 1930, exige compensar la relación de aminoácidos con otros componentes de piensos; por ello se prefiere agregar el altramuz en la formulación de piensos como portador de proteínas en una proporción del 10 al 20 por ciento del total del alimento, según el tipo de animal. Aunque el problema de la utilización es diferente, según se emplee en la alimentación de rumiantes o monogástricos, la principal dificultad que se presenta es la deficiencia en metionina del altramuz, unida a la elevada proporción de testa que es rica en fibra y que debe disminuirse. En rumiantes, el altramuz puede aprovecharse en distintas formas, desde forraje verde hasta el grano y el rastrojo para ovinos en el propio terreno. La situación se torna más compleja para los monogástricos por razón de la metionina, unido a los aún escasos conocimientos de la calidad química y nutricional de los carbohidratos de la semilla que parecen indigestibles para las aves.

El valor nutricional de la proteína del altramuz para el hombre se eleva significativamente cuando se complementa con metionina de síntesis al nivel del 2 por ciento de la proteína total, si bien la digestibilidad de dicha proteína queda condicionada por la pobre acción de las enzimas proteolíticas sobre las globulinas. La principal utilización se ha llevado a cabo combinando el altramuz con otros alimentos, aprovechando éste como fuente de proteína a bajo coste. Estudios metabólicos realizados en niños comprendidos entre 9 y 23 meses de edad, que consumieron harina de lupino, demostraron que la digestibilidad de la proteína del lupino es buena, aunque su calidad se ve disminuida por los factores antes mencio-



6. COMPOSICION EN ACIDOS GRASOS del lupino. El promedio graso de *L. albus* se sitúa en torno al 11 por ciento, en tanto que el de *L. mutabilis* se cifra alrededor del 19 por ciento. Esos valores han crecido, en algunas líneas, hasta el 18 y el 25 por ciento respectivamente, merced a los trabajos de mejora.



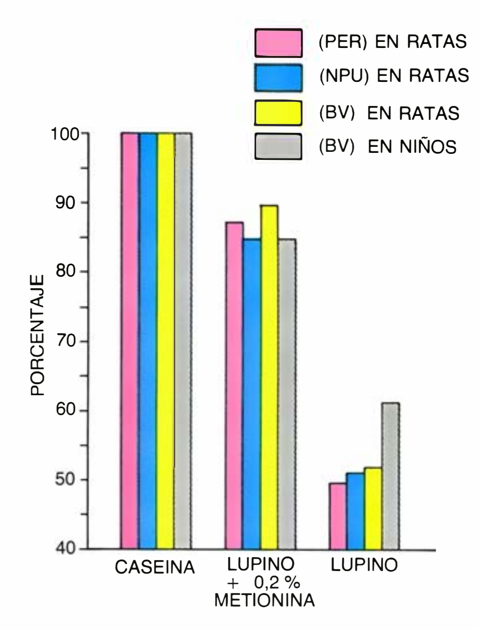
7. CONTENIDO MEDIO DE ALCALOIDE en especies amargas y dulces del lupino. En todas las semillas leguminosas hay sustancias antinutritivas, que rebajan su valor alimentario. En el altramuz ocupan el primer lugar los alcaloides denominados quinolizidínicos, que pertenecen al amplio grupo de las lupininas.

ANIMAL	CONCEPTO	UNIDAD
CERDOS	Energía digestible	4170 KILOCALORIAS
	Energía metabolizable	3885 KILOCALORIAS
	Coeficiente de utilización digestiva aparente del N_2	86
AVES	Energía metabolizable	2775 KILOCALORIAS
RUMIANTES	Unidad forrajera leche	1,23
	Unidad forrajera carne	1,21
	Energía digestible	4130 KILOCALORIAS
	Energía metabolizable	3410 KILOCALORIAS
	Materia nitrogenada digestible	336 GRAMOS
	Proteína digestible en el intestino delgado permitida por el N_2 fermentable	246 GRAMOS
	Proteína digestible en el intestino delgado permitida por la energía de los alimentos	158 GRAMOS

8. VALOR NUTRITIVO de *L. albus* en alimentación animal expresado en kilogramos de materia seca. Para que el altramuz entre en la dieta de rumiantes y aves, basta que se reduzca el nivel total de alcaloides hasta el 0,4-0,6 por ciento. Pero en cerdos (y en humanos) ese valor no debe sobrepasar el 0,02 por ciento.

nados y, en especial, el déficit de aminoácidos azufrados. El contenido proteico de la harina de *L. mutabilis* es, aproximadamente, el 54 por ciento de la materia seca y su contenido en grasa del 28 por ciento. Dicha harina es ligeramente amarillenta y, sometida a un breve proceso de tostación, antes de la molienda, mejora aún más sus características organolépticas, adquiriendo un sabor neutro o bien un ligero sabor a nuez, sin perder valor nutritivo en la tostación.

La mezcla de harina de altramuz con la de trigo en proporciones variables del cinco al 20 por ciento permite obtener un buen comportamiento reológico de dicha mezcla. El pan enriquecido con un 10 por ciento de harina de *L. mutabilis* alcanzó un 93 por ciento de calidad respecto al pan de trigo,



9. CALIDAD DE LA PROTEINA de la semilla de *L. mutabilis* medida sobre niños y ratas. Las siglas abrevian los siguientes parámetros: PER, relación de eficiencia de la proteína; PNU, utilización neta de la proteína, y BV simboliza aquí el valor biológico.

mientras que si el 10 por ciento añadido era de harina de *L. albus* la aceptabilidad era del 91 por ciento. Añadiendo un 10 por ciento de soja, en sustitución de *L. mutabilis*, la aceptabilidad alcanzada sólo fue del 78 por ciento. En todos los casos se evaluaban las características externas, internas y organolépticas.

Otros empleos en alimentación humana se centran en la preparación de galletas con un enriquecimiento comprendido entre el 30 y el 40 por ciento, que permite obtener un producto de alto valor nutritivo. También se ha utilizado en la elaboración de bizcochos, producción de pastas, elaboración de sustitutivos lácteos y en la preparación de purés y salsas. La semilla de *L. mutabilis* desamargada y fresca entra, frecuentemente, en la elaboración de sopas y menestras.

Gracias a la selección realizada por el hombre, el altramuz se ha transformado de planta más o menos salvaje en planta cultivable. Del altramuz amargo se ha pasado a una planta que sólo contiene trazas de alcaloides y cuyas vainas son totalmente indehiscentes. De variedades con débiles producciones se ha cambiado a otras con excelentes rendimientos, adaptadas a climas distintos de su centro de origen, resistentes al frío y a las plagas y enfermedades.

Sin duda el problema más importante que se le plantea a la mejora genética del altramuz es el de los alcaloides. Se ha afirmado que la eliminación de alcaloides por selección genética representaría una disminución del rendimiento de la planta, así como un debilitamiento de su adaptación al medio; la existencia actual de variedades de bajo contenido en alcaloides, muy productivas, parece confirmar lo contrario. Von Sengbusch (1928-1930) fue el primero en lograr una reducción drástica del contenido de alcaloides en *L. luteus* y *L. angustifolius* mediante selección genética. Con posterioridad se obtuvo el *L. albus* dulce. *L. mutabilis*, que presenta un alto potencial de producción de proteínas y grasas y tiene limitación en su empleo debido al alto porcentaje de alcaloides de la semilla. Recientemente se ha conseguido, por selección, reducir el contenido de alcaloides, aunque no en la proporción suficiente para poder destinarlo directamente al consumo humano.

Contamos con una buena información sobre la reducción genética de alcaloides en las especies de altramuz del Viejo Mundo; sin embargo, los datos que se poseen son bastante más escasos en *L. mutabilis*. En esta especie, la herencia del carácter dulce es más compleja que en las demás conocidas. La frecuencia de plantas de bajo contenido en alcaloides de las poblaciones silvestres de *L. mutabilis* es sumamente baja; se ha cifrado en una proporción de uno a un millón. En este contexto, la organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) está promoviendo el estudio de las poblaciones silvestres y ecotipos de lupino, tanto de las especies actualmente cultivadas como de otras que potencialmente puedan serlo.

La superficie cultivada de altramuz en el mundo se aproxima a los dos millones de hectáreas, repartido entre la producción de grano, forraje y abono verde. Se cosecha, sobre todo, en la URSS, Australia y Polonia. La especie *L. luteus* es la más cultivada, principalmente en URSS y Polonia, donde se siembran variedades dulces, y también en otros países europeos como España y Portugal, en los que se emplean ecotipos amargos. *L. angustifolius* es la especie más difundida y con mayor extensión en Australia. También se cultiva en la URSS, Polonia, Sudáfrica, EE.UU., Brasil, Chile y países del área mediterránea; en la mayoría de los casos las variedades sembradas son dulces. La especie *L. albus*, aunque con menor superficie total, también está ampliamente repartida. Se cultiva en Europa, URSS, Sudáfrica, EE.UU., Brasil y Chile. Se siembran, sobre todo, variedades dulces y algún que otro ecotipo amargo en su área de origen (mediterránea). *L. mutabilis* sólo se siembra en los Andes, su zona de origen, pues hasta ahora los resultados de adaptación del cultivo a otras zonas no han sido muy alentadores. Otras es-

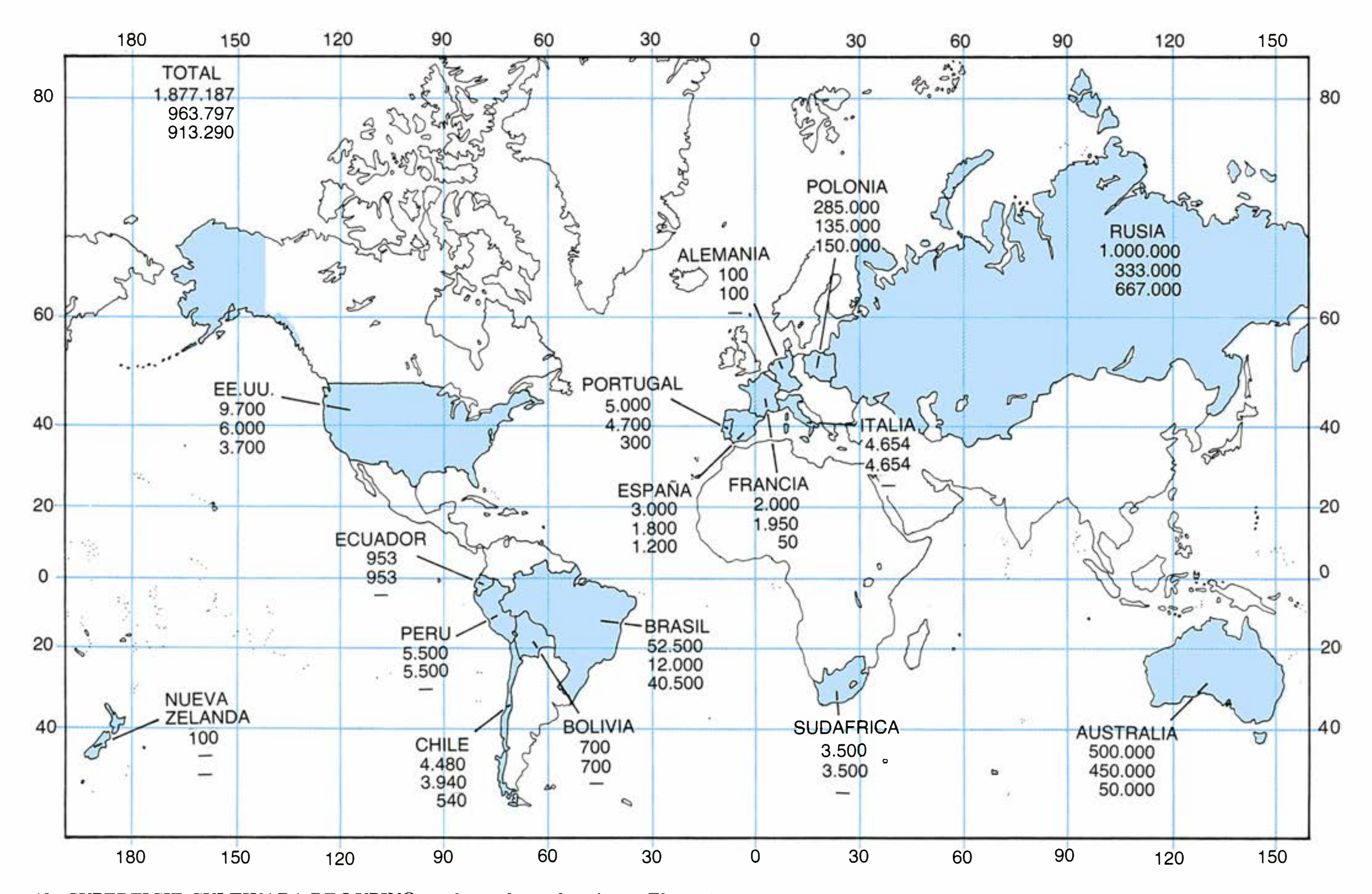
pecies cultivadas son *L. polyphillus*, en URSS, como abono verde y *L. arboreus*, en Nueva Zelanda, para recuperar y convertir suelos de dunas en plantaciones forestales.

Los rendimientos muestran una amplia variación, en función de la zona, el sistema de producción y la especie cultivada. *L. albus* es la especie que ofrece un mayor potencial de producción. La participación del altramuz en los sistemas de producción agrícola es muy variada, según países, y en función de las condiciones ecológicas y de los diferentes aprovechamientos de que es susceptible. Se utiliza como abono verde o sideral en grandes extensiones de Brasil y en algunas regiones de EE.UU., Europa y la zona andina. Como forraje verde es utilizado en Rusia, precediendo al trigo y al centeno de invierno, y en Polonia se intercala entre los cultivos de maíz y cereal de invierno. En Australia alterna con otros pastos anuales. En el sur de Portugal y algunas zonas del suroeste de España se cultivan ecotipos de *L. luteus* dehiscente como pradera permanente, que es aprovechada en pastoreo por ovinos durante el período estival, una vez agostada la planta, lo que facilita la autorresiembra. La producción de grano se sitúa en rotaciones de cultivo muy diversas, aunque casi siempre están presentes los cereales de invierno y primavera. En la zona andina alterna con la patata, el maíz y plantas típicas como la quinua. También se cultiva en rotación con praderas temporales en Chile, Australia y Portugal; y, por último, alternando con la remolacha y la patata, además de con cereales, en URSS y Polonia.

Existen diferentes problemas que limitan la expansión del cultivo del altramuz y la utilización del grano y el forraje. Entre los más importantes, citaremos los siguientes: escasez y variabilidad de los rendimientos, así como elevada sensibilidad del cultivo a las condiciones ambientales; pocas variedades adaptadas a las diferentes zonas y escasa producción de semilla; prácticas agronómicas deficientes y poco mecanizadas, con inadecuado control de malas hierbas; ataques de plagas y enfermedades; toxicidad del grano amargo en la alimentación y escasa comercialización.

Dificultades que podrán remontarse si nos atenemos a las perspectivas más fundadas, en particular las relativas a la recogida y evaluación de germoplasma, con planes de selección y mejora genética para obtener variedades adaptadas, precoces, indehiscentes, de bajo porte, bajo contenido en alcaloides y resistentes a enfermedades, frío y clorosis. Amén de otras muchas líneas de investigación complementarias en relación con la agronomía y la tecnología alimentaria. A modo de botón de muestra, la Comunidad Económica Europea ha introducido recientemente al altramuz dentro de su política de protección de plantas productoras de proteínas, subvencionando el consumo en la alimentación animal.

Ante la escasez de proteínas que padece actualmente la población mundial vale la pena volver la mirada hacia las leguminosas y entre ellas al altramuz, que a pesar de sus dificultades y problemas fue cultivado durante miles de años en muchas zonas del mundo. Su contribución como cultivo poco exigente y ahorrador de energía parece interesante a la hora de establecer un nuevo sistema productivo.



10. SUPERFICIE CULTIVADA DE LUPINO en el mundo, en hectáreas. El primer guarismo corresponde a la superficie total dedicado al cultivo de la planta; el segundo y tercero responden a su utilización, aquél en grano y éste en forraje y abono verde. Ante la escasez de proteínas que padece la humanidad, distintos organismos internacionales, entre ellos la Comunidad Económica Europea, han introducido o promovido políticas de protección del altramuz.

La célula *T* y su receptor

Desempeña esta célula un papel decisivo en la lucha del organismo contra infecciones víricas y en el rechazo de tejidos trasplantados. Se ha identificado ya la molécula responsable de tal comportamiento

Philippa Marrack y John Kappler

En los animales vertebrados, las células del sistema inmunitario se encargan de reconocer los antígenos, material foráneo, que han invadido sus cuerpos. Tras la invasión, la respuesta inmunitaria que se desencadena es extraordinariamente específica. Así, una persona vacunada, y por tanto inmunizada, contra la viruela puede resistir una infección posterior de dicho virus, pero no, por ejemplo, la del virus de la gripe. En la última década, los inmunólogos han conseguido identificar el componente del sistema inmunitario cuya función consiste en reaccionar específicamente contra los virus. Se trata de unas pequeñas células, denominadas linfocitos *T*, o células *T*. Desempeñan también un papel auxiliar fundamental en la respuesta inmunitaria a las infecciones bacterianas.

Desde hace tiempo se sabe que la responsabilidad de dicha respuesta recae sobre el receptor de la célula *T*, una molécula situada en su membrana. Según parece, el antígeno se une de forma específica al receptor, como una llave lo hace a su correspondiente cerradura. Así se pone en marcha la complicada serie de acontecimientos bioquímicos que constituyen la respuesta inmunitaria. Por diversas razones, el aislamiento del receptor de las células *T* ha resultado muy difícil. De hecho, hasta hace poco, y por desconocimiento de su estructura, sus propiedades se inferían de forma indirecta. Empieza ahora a vislumbrarse dicha estructura.

El esclarecimiento de la estructura del receptor está propiciando un mejor conocimiento de las complejas interacciones de las células *T* con otros elementos del sistema inmunitario. En particular, la célula *T* parece especialmente adaptada a responder a elementos infecciosos asociados con células del hospedador, y no a los que circulan libremente por sus fluidos corporales. Para llevar a cabo esa función, el receptor de la célula *T*, además de reconocer al antígeno específico, debe reconocer también ciertas proteínas de membrana de la propia célula del hospedador. Tal mecanismo de reconocimiento debe estar sometido a un riguroso control, pues si una célula *T* fuese activada por las propias proteínas del hospedador las consecuencias serían nefastas para las células del organismo. La necesaria precisión del sistema de reconocimiento de las células *T* se refleja en sus muchas y fascinantes propiedades, importantes, además, desde el punto de vista clínico. En los transplantes o injertos de tejidos, por ejemplo, las células *T* responden rápidamente, poniendo en marcha la maquinaria de rechazo. Las investigaciones relacionadas con esos receptores presentan, por tanto, un enorme interés desde el punto de vista quirúrgico.

Además de la célula *T*, hay otro tipo de linfocito capaz de unirse específicamente a un antígeno: la célula *B*. Ambos tipos celulares proceden de la médula ósea, aunque la célula *T* sufre un desarrollo posterior en la glándula del timo, situada, en el hombre, bajo la parte superior del esternón. En los vertebrados superiores esas células circulan por la sangre y la linfa, concentrándose en los principales órganos linfáticos: los nódulos linfáticos y el bazo. Su vida media es larga. En el hombre llegan a persistir sin dividirse durante muchos años. En respuesta a un antígeno, sin embargo, los linfocitos engordan considerablemente, se dividen con rapidez y excretan factores proteicos que contribuyen a eliminar los organismos o materiales foráneos invasores.

En la respuesta inicial de la célula *B* a un antígeno, según se sabe desde hace algún tiempo, participa una proteína receptora localizada en la membrana celular. El antígeno se une al receptor y esa unión insta a las células *B* a dividirse y diferenciarse en un clon de células plasmáticas, que excretan anticuerpos dotados de las mismas propiedades de unión al antígeno que las moléculas receptoras situadas en la superficie de la célula *B* progenitora. De hecho, el anticuerpo es idéntico al receptor de la célula *B* que originalmente reconoció al antígeno, salvo que carece de la cadena de aminoácidos responsable de anclar la proteína receptora en la membrana de la célula *B*. Anticuerpos y receptores de las células *B* se denominan también inmunoglobulinas.

Una vez excretados a la sangre o la linfa, los anticuerpos se unen a los antígenos libres, marcándolos para que los destruyan otros componentes del sistema inmunitario. En conjunto, al proceso de "selección" de una célula *B* por parte de un antígeno en virtud de su capacidad para reproducirse clonalmente y fabricar anticuerpos contra él se le denomina teoría de la selección clonal. Data de los años sesenta y la desarrollaron Sir Macfarlane Burnet, del Instituto Walter y Eliza Hall de Investigaciones Médicas de Melbourne, David W. Talmage, a la sazón en la Universidad de Chicago, y Niels Kaj Jerne, entonces en la Organización Mundial de la Salud.

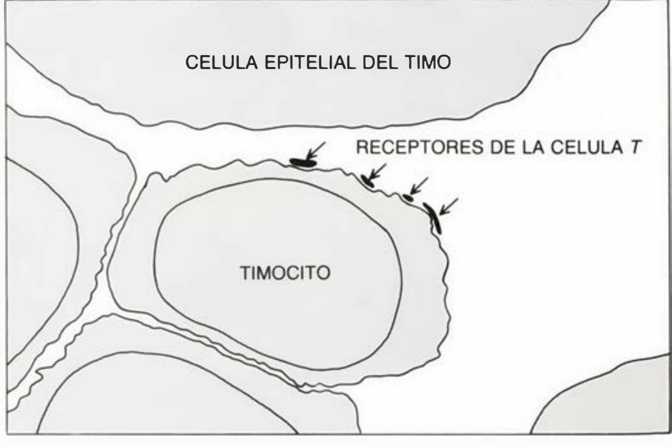
Cuando cumplen el papel de receptores de células *B*, los anticuerpos se hallan en cantidades muy pequeñas. Sin embargo, una vez estimulada la célula *B* por el antígeno, los anticuerpos aparecen en el suero en grandes cantidades y en forma soluble. También excretan gran volumen de anticuerpos ciertos tipos de células *B* cancerosas, como los plasmacitomas. La disponibilidad de grandes concentraciones de anticuerpo soluble, y su capacidad para unirse a los antígenos, permite aislarlos de forma relativamente fácil y estudiar en detalle la estructura del receptor de la célula *B*.

Menos sencillo ha resultado el análisis del receptor de la célula *T*. En res-

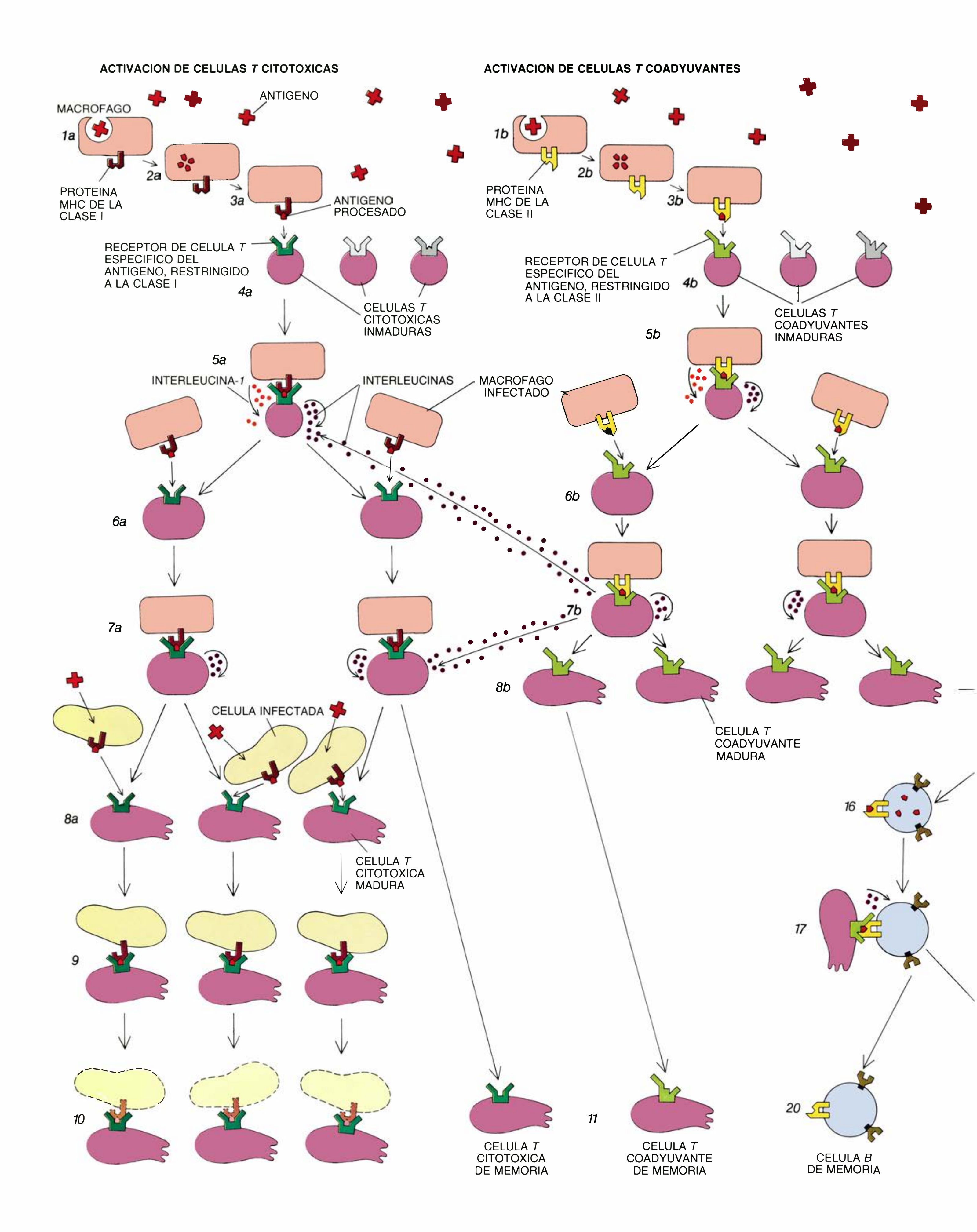
puesta a la presencia de un antígeno la célula *T*, como la *B*, se multiplica clonalmente y se diferencia en un tipo celular específico. Así, las células *T* citotóxicas, tras reconocer los antígenos víricos en la superficie de células infectadas, las matan. Las células *T* supresoras inhiben la respuesta inmunitaria contra un antígeno poco tiempo después de iniciarse ésta. Por último, las células *T* coadyuvantes reconocen los antígenos situados en la superficie de una célula *B* cuando ésta ha reaccionado previamente con dicho antígeno. Tras esa reacción, las células *T* coadyuvantes liberan linfocinas, unas moléculas similares a las hormonas que inducen la multiplicación y diferenciación de las células *B*. Así, dos llaves ponen en marcha el enorme potencial destructor de la célula *B*: una, el antígeno libre, que actúa sobre el receptor de la célula *B*; otra, el antígeno de superficie de la célula *B*, que lo hace sobre el receptor de la célula *T*.

Los linfoticos *T* nunca se diferencian en células excretoras de anticuerpos. Por esa razón no resulta fácil obtener receptores de la célula *T* en las cantidades y condiciones de pureza y solubilidad necesarias para un análisis adecuado. Las características estructurales de los anticuerpos y su extraordinaria eficacia en el reconocimiento de antígenos llevaron a pensar durante mucho tiempo que, para unirse y responder al antígeno, las células *T* contaban con el mismo tipo de moléculas que las *B*.

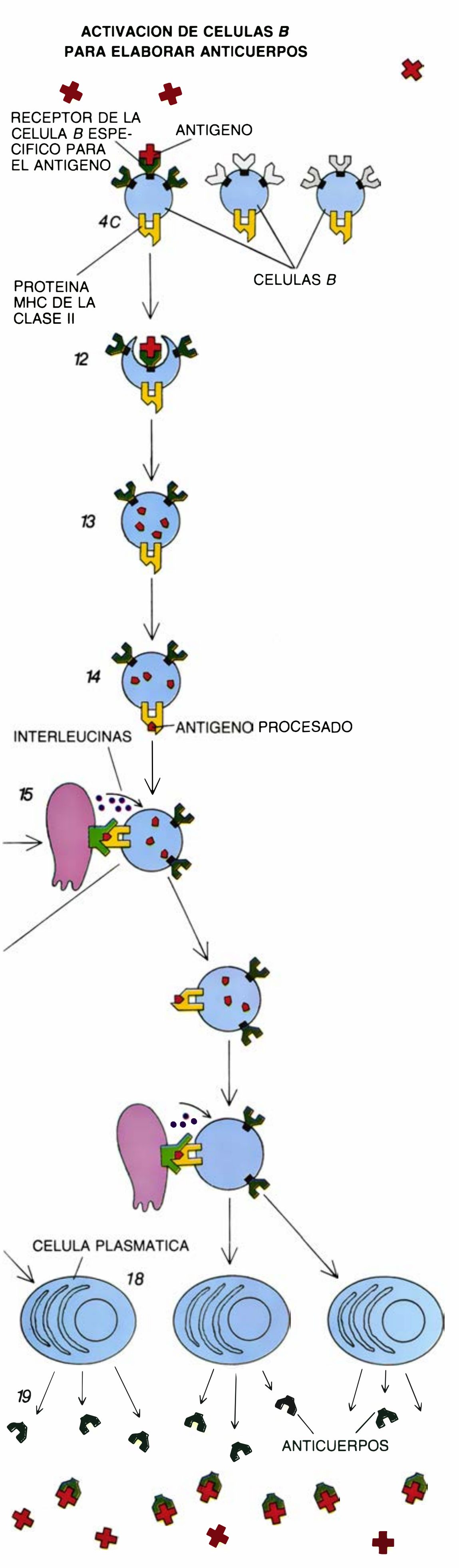
Muchos investigadores han dedicado años al examen de las superficies de las células *T* y sus secreciones, tratando de localizar inmunoglobulinas. Aunque tras intensas búsquedas se ha sugerido que las células *T* supresoras se unen a los antígenos utilizando moléculas similares a las inmunoglobulinas, la realidad es que en muchos experimentos se ha demostrado que la mayoría de las células *T* no están asociadas con ese tipo de molé-



1. "EDUCACION" de una célula *T* en el timo. Le confiere la capacidad de distinguir entre células "propias" y "ajenas", que constituye un elemento fundamental de la especificidad de la respuesta inmunitaria. En la fotomicrografía el timocito, o célula *T* inmadura, aparece junto a una célula epitelial que forma parte del revestimiento del timo [*véase el esquema de la derecha*]. Las zonas oscuras corresponden a moléculas receptoras situadas en la superficie del timocito, probablemente unidas a proteínas que definen la "identidad" situadas sobre la célula epitelial. Tales proteínas están determinadas por una región del genoma denominada complejo mayor de histocompatibilidad (MHC). Puede que esa unión estimule la educación, o maduración, del timocito. Las células *T* maduras adquieren una baja afinidad por las proteínas MHC propias, mientras que esa afinidad es mucho mayor si las proteínas están asociadas con antígenos. Las células *T* sólo desencadenan la respuesta inmunitaria contra sus propias células infectadas o contra células de otros animales. A. G. Farr, de la Universidad de Washington, tomó la fotomicrografía, cuyo aumento aquí es de 20.900 ×.



ACTIVACION DE CELULAS *T* CITOTOXICAS
ACTIVACION DE CELULAS *T* COADYUVANTES
MACROFAGO
ANTIGENO
1a
2a
3a
PROTEINA MHC DE LA CLASE I
ANTIGENO PROCESADO
RECEPTOR DE CELULA *T* ESPECIFICO DEL ANTIGENO, RESTRINGIDO A LA CLASE I
4a
CELULAS *T* CITOTOXICAS INMADURAS
1b
2b
3b
PROTEINA MHC DE LA CLASE II
RECEPTOR DE CELULA *T* ESPECIFICO DEL ANTIGENO, RESTRINGIDO A LA CLASE II
4b
CELULAS *T* COADYUVANTES INMADURAS
5a
INTERLEUCINA-1
INTERLEUCINAS
MACROFAGO INFECTADO
5b
6a
6b
7a
7b
8b
CELULA *T* COADYUVANTE MADURA
CELULA INFECTADA
8a
CELULA *T* CITOTOXICA MADURA
16
17
9
10
11
20
CELULA *T* CITOTOXICA DE MEMORIA
CELULA *T* COADYUVANTE DE MEMORIA
CELULA *B* DE MEMORIA



culas. Ni las secretan ni se encuentran en sus membranas y citoplasma. Otros experimentos prueban que ni siquiera disponen de los ARN mensajeros correspondientes. Es más, examinados en las células *T* los genes de las inmunoglobulinas, se ha advertido que no suelen presentar la reordenación propia de las células *B*.

Esos resultados negativos se acumularon durante la década de 1970 y principios de los años 80. Aunque no muy persuasivos al considerarlos aisladamente, el peso del conjunto de datos negativos llevó a los inmunólogos moleculares a cambiar gradualmente de estrategia experimental. Puesto que no se encontraba relación entre las inmunoglobulinas y las células *T*, había que buscar en otra parte los receptores antigénicos de dichas células.

Los estudios sobre rechazos de injertos de tejidos en animales habían conducido a los inmunólogos celulares a esa misma conclusión algunos años antes. Así, por ejemplo, se sabía que las células procedentes de cierta estirpe de ratón sufrían un rápido rechazo al inyectarlas en otra estirpe genéticamente distinta. A principios de los años treinta, Peter Gorer y otros investigadores demostraron que el rechazo se debía a la presencia de moléculas antigénicas en las superficies de las células del ratón donante.

Las proteínas que marcan a toda célula como "foránea" o "propia" están determinadas por los genes situados en la región de ADN denominada complejo mayor de histocompatibilidad (MHC). En adelante, a esas proteínas las llamaremos proteínas MHC. Una de sus propiedades más sobresalientes es su alto grado de polimorfismo: para cada proteína existen millones de alelos, o variantes, de los genes MHC. De ahí que resulte muy baja la probabilidad de que dos invididuos no emparentados tengan idénticas proteínas MHC.

Tras los trabajos de Gorer se fue advirtiendo cada vez con más claridad que el rechazo de injertos y las proteínas MHC guardaban una estrecha relación con la respuesta inmunológica. Sir Peter Medawar y otros demostraron que incumbía a los linfocitos el reconocimiento de las moléculas antigénicas de los injertos de tejido foráneo. En trabajos posteriores se demostró que los linfocitos implicados en el rechazo de transplantes eran las células *T* y no las *B*. Sin embargo, puesto que los transplantes de tejidos no son hechos que se den en la naturaleza, los inmunólogos seguían albergando dudas acerca de la función de las proteínas MHC.

A mediados de la década de los 60 empezaron a recabarse indicios de la función que podría corresponder a esas proteínas. Hugh O. McDevitt, a la sazón en el Instituto Nacional de Investigaciones Médicas de Inglaterra, y Michael Sela, del Instituto Weizmann de Ciencias de Israel, y Baruj Benacerraf, por entonces en el Instituto Nacional de Alergias y Enfermedades Infecciosas, y sus colegas estudiaron la respuesta a los antígenos en varias estirpes animales. Según observaron, la respuesta de los ratones ante ciertos antígenos sintéticos dependía de las características genéticas de cada ratón. Por ejemplo, al inyectarles el polímero denominado TGAL, los ratones portadores de alelos *b* en su MHC elaboraban anticuerpos contra el polímero, mientras que no lo hacían los que lle-

2. RESPUESTA ESPECIFICA CONTRA EL ANTIGENO. El esquema presenta tres tipos principales de (*derecha*). Un macrófago engulle el antígeno invasor (*arriba*) (*1a, 1b*), lo altera o digiere en trozos pequeños (*derecha*). Un macrófago engulle el antígeno invasor (*arriba*) (*1a, 1b*), lo altera o digiere en trozos pequeños (*2a, 2b*) y así lo exhibe sobre la superficie del macrófago (*3a, 3b*), donde el antígeno se une a una de las dos clases de proteínas MHC. Se une a él una célula *T* cuyo receptor encaje en el complejo antígeno-proteína, quedando así "seleccionada" por dicho complejo la célula *T* para propagarse clonalmente (*4a, 4b*). De la misma manera, el antígeno libre selecciona una célula *B* uniéndose a su receptor (*4c*). Las células *T* que hayan de ser citotóxicas se unen a antígenos asociados con proteínas MHC de la clase I (*5a*), mientras que las futuras células *T* coadyuvantes lo hacen a antígenos asociados con proteínas MHC de la clase II (*5b*). La unión con la célula *T* induce al macrófago a secretar una molécula de tipo hormonal, la interleucina-1, que estimula la división y diferenciación de la célula *T* (*6a, 6b*). Continúa la división celular en tanto persiste el estímulo de las células que presentan el antígeno en su superficie (*7a, 7b*). Las células *T* maduras pueden ya desempeñar su función (*8a, 8b*). Si es citotóxica, se unirá (*9*) y matará (*10*) a una célula infectada que presente el antígeno, o bien se mantendrá circulando por la sangre y linfa a modo de célula de memoria, que responderá con mayor rapidez ante un futuro antígeno del mismo tipo (*11*). También las células coadyuvantes maduras constituyen células de memoria. La función de las células *T* coadyuvantes es estimular la proliferación de las células *B* activadas. Después de engullir el antígeno que llevaba unido (*12*) y procesarlo (*13*), la célula *B* también presenta en su superficie un fragmento del antígeno, unido a una proteína MHC de la clase II (*14*). La célula *T* coadyuvante madura puede entonces unirse al complejo antígeno-proteína de la célula *B* (*15*). La unión libera interleucina, que induce la división y diferenciación de la célula *B* (*16*). Prosigue la división celular en tanto la estimulen las células *T* coadyuvantes (*17*). Las células plasmáticas maduras (*18*) liberan entonces sus receptores específicos de antígenos en forma de anticuerpos; éstos se unen a los antígenos libres y los "marcan" para que sean destruidos (*19*). Otras células *B* maduras del clon se reservan como células de memoria (*20*). El esquema incluye los resultados de los experimentos descritos en el artículo por los autores, así como los obtenidos en otros ensayos, aunque ciertos detalles del modelo son aún materia de controversia.

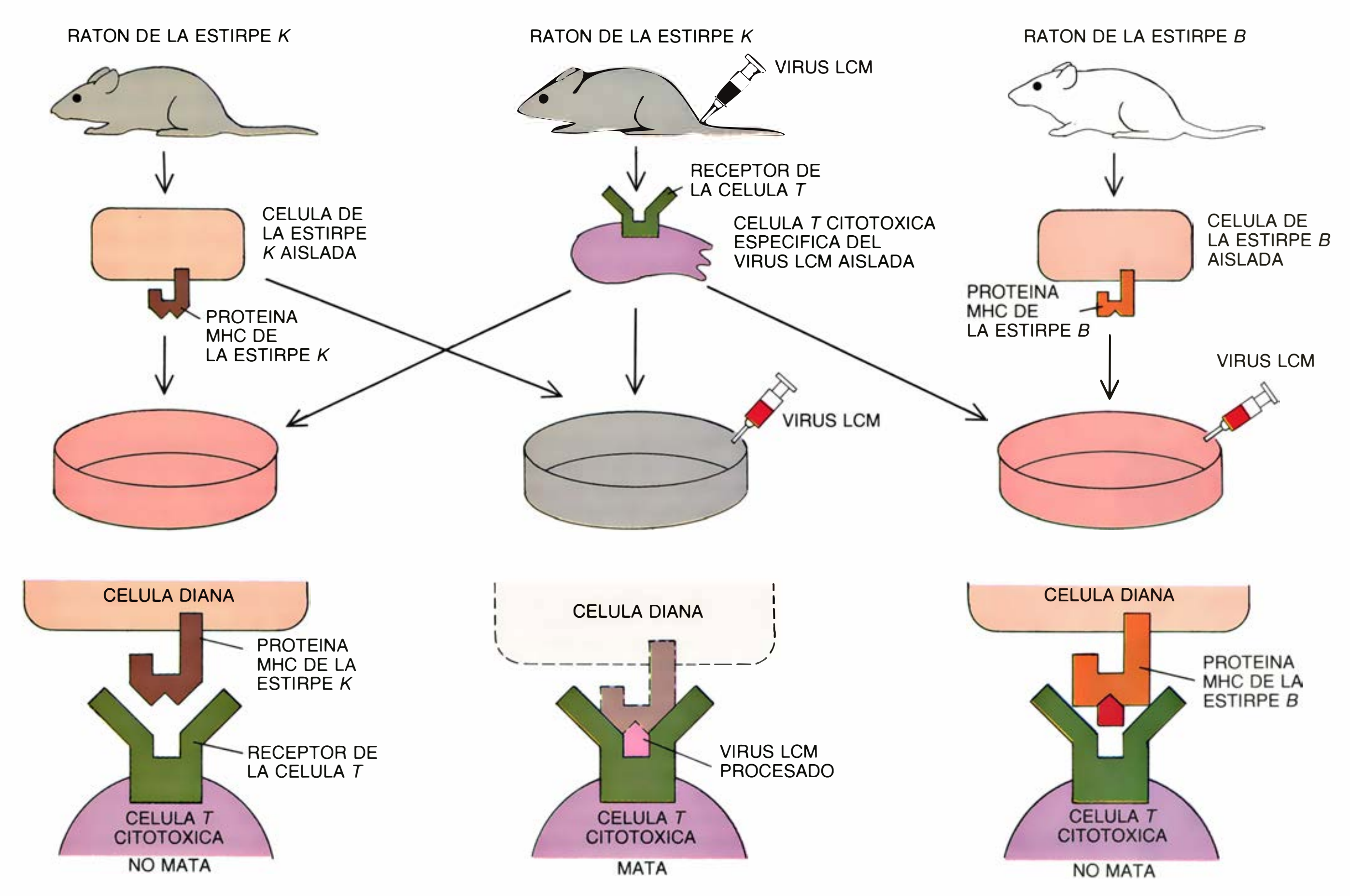
vaban alelos *k*. Pronto se supo que esos genes afectaban a la función de las células *T*, pero no a otros tipos celulares del sistema inmunitario.

Ante esas observaciones, algunos inmunólogos sugirieron que el receptor de la célula *T* podría venir determinado por el MHC. De ser ello así, cabría esperar que los diversos tipos de MHC instasen diferentes receptores de células *T*, lo cual explicaría las diferencias, en sus respuestas al TGAL, entre estirpes de ratones. Hubo que descartar la teoría al comprobarse que, en el ratón, algunas de las proteínas MHC que afectan a la unión del TGAL ni siquiera se expresan en la superficie de la célula *T*. Por tanto, el origen de las diferencias observadas no podía situarse sólo en el receptor de la célula *T*, ni había ya por qué suponer que el MHC determinaba el receptor. Los resultados del experimento apoyaban una concepción más sutil: las diferencias entre las respuestas de los anticuerpos al TGAL indicaban que las proteínas MHC afectaban a la forma en que el receptor de la célula *T* reconocía al TGAL. Venía ello a sugerir por primera vez que para que actuase el receptor era necesaria cierta interacción entre los antígenos y las proteínas MHC.

¿Cómo se justificaba tan dispar conjunto de resultados? La respuesta la aportarían los trabajos pioneros de Ethan M. Shevach y Alan S. Rosenthal, realizados en el Instituto Nacional de la Alergia y Enfermedades Infecciosas, David H. Katz y Benacerraf, en la Facultad de Medicina de Harvard, Bernice Kindred, en la Universidad de Constanza, Alemania Federal, Donald Shreffler, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Michigan, y, fundamentalmente, las valiosas investigaciones de Rolf Zinkernagel y Peter C. Doherty, de la Universidad Nacional de Australia.

En un experimento, Zinkernagel y Doherty inyectaron en ratones dosis subletales del virus LCM (coriomeningitis linfocítica). De los animales inmunizados aislaron células *T* citotóxicas específicas del LCM [*véase la figura 3*]. La función normal de esas células *T* es el reconocimiento de los antígenos víricos en las células infectadas y la destrucción de éstas. La mayoría de las estirpes de ratón fabrican anticuerpos contra los virus LCM; de modo que eran pues escasas las probabilidades de que, como había ocurrido con el TGAL, algunas estirpes de ratón no desencadenaran respuesta inmunitaria ante el virus. Sin embargo, Zinkernagel y Doherty comprobaron con sorpresa que las células *T* de estirpes *k* de ratón inmunizadas con el virus LCM sólo mataban las células infectadas que llevaban al menos una de las diversas proteínas MHC de la estirpe *k*. En otras palabras, las células *T*, letales para las células infectadas portadoras de proteínas MHC específicas de la estirpe *k*, podían no serlo para las células de una estirpe de ratón emparentada e infectadas con el mismo virus, pero que portaban la variedad *d*, por ejemplo, de la misma serie de proteínas MHC.

Este y otros experimentos demostraban que las células *T* citotóxicas no sólo atendían a los antígenos víricos de las células infectadas, sino también a la secuencia de aminoácidos de las proteínas MHC que había en esas mismas células. Otros investigadores no tardaron en demostrar que igual ocurría en células *T* citotóxicas específicas de otros



3. SOLO RESPONDE AL ANTIGENO la célula *T* tras unirse a la vez a éste y a una proteína MHC que se encuentre sobre la superficie de la célula diana. Las células *T* de una estirpe *k* de ratón, inmunizada contra el virus de la coriomeningitis linfocítica (LCM), matan las células que exhiben proteínas MHC de tipo *k* si se infectan éstas con el virus LCM (*centro*). Las células *T* no matan a las células infectadas con el virus que no llevan proteínas MHC de tipo *k* (*derecha*), y tampoco a las células no infectadas aunque muestren las proteínas de tipo *k* (*izquierda*). La especificidad, por tanto, rige también para moléculas propias.

antígenos. Recibe hoy ese fenómeno el nombre de restricción por MHC. En general, las proteínas MHC reconocidas por las células *T* citotóxicas pertenecen a una única clase estructural, las proteínas I, que se encuentran en la superficie de todas las células nucleadas del cuerpo.

Nuestro grupo, además de otros investigadores, descubrió entonces que las células *T* coadyuvantes presentaban el fenómeno de restricción por MHC. En general, sin embargo, la célula *T* coadyuvante reconoce un tipo diferente de proteínas MHC, las de la clase II. La expresión de estas proteínas está mucho menos extendida por el cuerpo que la de la clase I. Las proteínas de la clase II se encuentran sólo en las células *T*, células *B*, macrófagos y ciertas células de otros tejidos.

Tan pronto se descubrió el fenómeno de la restricción por MHC resultó evidente que los hechos encajaban por igual en dos interpretaciones distintas. Una, la teoría del receptor único, proponía en su enunciado más radical que cada célula *T* llevaba un único tipo de receptor, que se uniría a un complejo de antígeno y proteína MHC instalado en la superficie de la célula de presentación del antígeno. La segunda teoría, la del doble receptor, defendía, también en su enunciado más extremo, que las células *T* disponían de dos tipos de receptores, uno para el antígeno y otro para la proteína MHC.

Ambas ofrecían ventajas e inconvenientes. La teoría del receptor único aclaraba por qué las células *T* rara vez se unen al antígeno o a la proteína MHC sin hacerlo a ambas moléculas. También se ajustaba perfectamente a las observaciones de McDevitt, Sela y Benacerraf acerca de las propiedades inmunogénicas del TGAL en ratones. Si el receptor único de célula *T* debe unirse simultáneamente a un complejo formado por el antígeno y la proteína MHC, la falta de respuesta de la estirpe *k* de ratón al TGAL puede deberse a que el antígeno sea incapaz de formar complejo con la correspondiente proteína MHC de la estirpe *k*. Por otra parte, la teoría del doble receptor salva uno de los inconvenientes de la otra interpretación, a saber, no precisa postular la interacción entre todas las formas antigénicas y las formas constantes de las proteínas MHC que se encuentran en cualquier individuo.

Aunque aún no se ha dicho la última palabra al respecto, los datos disponibles parecen favorecer la teoría del receptor único. Así lo indican los estudios efectuados por nuestro grupo acerca de las propiedades de células *T* híbridas que expresan receptores heredados de dos progenitores distintos [*véase la figura 4*]. Se aislaron primero células *T* coadyuvantes que reconocen de forma específica el antígeno ovoalbúmina de pollo (OVAc) cuando se encuentra asociado con ciertas proteínas de la clase II de estirpes *k*. Se fusionaron esas células con un tumor de células *T*, al objeto de generar un hibridoma de células *T*, células híbridas que in vitro se dividen rápidamente y pronto forman clones.

Para obtener una célula con dos tipos diferentes de receptores fusionamos uno de nuestros hibridomas con una segunda serie de células *T*, específica para otro antígeno. Este segundo tipo celular respondía sólo al antígeno hemocianina de lapa (KLH) en presencia de proteínas de la clase II de estirpes *f*.

Estudiamos la respuesta de las células fusionadas frente a los antígenos OVAc y KLH, asociados con células presentadoras de antígenos de estirpes *k* y *f*. De ser cierta la teoría del doble receptor cabría esperar que las células *T* fusionadas portasen cuatro tipos de receptores, uno para cada tipo de antígeno y uno para cada tipo de proteína MHC de la clase II. Podrían responder, por tanto, a ambos antígenos, ya los presentara una célula de tipo *k* u otra de tipo *f*. Encontramos, sin embargo, que respondían a los antígenos según la pauta de sus progenitores: al OVAc asociado con células de tipo *k* y al KLH asociado con células *f*. No había indicios de respuesta al OVAc en células *f* o al KLH en células *k*.

De ser cierta la teoría del receptor único, el antígeno y la proteína MHC deben formar algún tipo de complejo antes de unirse a una célula *T*. Los resultados de varios experimentos sugieren que se da cierta interacción entre las proteínas MHC y los antígenos, pero en pocas ocasiones se ha detectado directamente esa interacción. Quizá la demostración más contundente sean los recientes trabajos de Emil R. Unanue y sus colegas, de la Universidad de Washington.

Unanue y sus colegas identificaron un pequeño antígeno, reconocido por las células *T* cuando va asociado a proteínas MHC de estirpes *k*, pero no si se trata de estirpes *d*. Prepararon concentraciones similares del antígeno en solución a ambos lados de una membrana semipermeable y colocaron a un lado de la membrana la proteína MHC de una de las dos estirpes. Dado que la molécula de antígeno es mucho menor que cualquiera de las proteínas MHC, la membrana permitía el paso al antígeno, pero no a la proteína.

Unanue y su grupo comprobaron que cuando en el compartimento se colocaba la proteína MHC de la estirpe *k* y se esperaba el equilibrio de la concentración de antígeno, era superior ésta en el compartimento que contenía las proteínas de tipo *k*. Las concentraciones del antígeno no variaban si el experimento se realizaba con proteínas de estirpes *d*. Sugiere ese resultado que, al menos en ciertas ocasiones, el antígeno se une a la proteína MHC con la que se le reconoce, aunque el proceso quizá no sea muy eficaz.

Descifradas ya todas esas características de los receptores de las células *T* seguía, empero, constituyendo un misterio la identidad de la proteína responsable de su actividad. Sí se sabía que al menos en un aspecto diferían el receptor y la molécula de anticuerpo. Independientemente de si el receptor lo formaban una o dos proteínas, alguno de sus componentes era capaz de reconocer proteínas MHC; no era ese el caso de los anticuerpos.

Dos grandes avances tecnológicos permitieron a los investigadores entrar en la resolución de la estructura del receptor de la célula *T*. Uno de ellos se fundamenta en los trabajos realizados a principios de los años setenta por George Köhler y Cesar Milstein en el Laboratorio de Biología Molecular del Consejo de Investigaciones Médicas de Cambridge. Dieron con la forma de obtener hibridomas de células *B* capaces de excretar in vitro grandes cantidades de un tipo específico de anticuerpo. Se trata de los anticuerpos monoclonales, que pueden producirse y purificarse en cantidades ingentes. El segundo gran avance fue el desarrollo de métodos para mantener en cultivo clones de células *T*, o hibridomas de células *T*, dotados de especificidad frente a antígenos y proteínas MHC. Al igual que otros grupos de investigadores, nos hemos servido de ambas técnicas para fabricar anticuerpos contra receptores de células *T*, entudiando con ellos las propiedades estructurales del receptor.

Para obtener anticuerpos contra un receptor de células *T* construimos en primer lugar un hibridoma de célula *T* dotado de un receptor capaz de reconocer el antígeno OVAc y una proteína de la clase II de estirpes *d*. Al entrar en contacto los receptores de tales hibridomas con el antígeno y la proteína MHC pertinentes, respondían de

TEORIA DEL RECEPTOR UNICO

RECEPTOR PARA PROTEINA DE ESTIRPE *F* Y ANTIGENO KLH
CELULA DE PRESENTACION DEL ANTIGENO
PROTEINA MHC DE ESTIRPE *F*
CELULA *T*
ANTIGENO KLH
CELULA *T* HIBRIDA
CELULA *T*
ANTIGENO OVAc
PROTEINA MHC DE LA ESTIRPE *K*
RECEPTOR PARA PROTEINA DE LA ESTIRPE *K* Y ANTIGENO OVAc
ESTIRPE *F*
ANTIGENO KLH
ESTIRPE *K*
ANTIGENO OVAc

TEORIA DEL DOBLE RECEPTOR

RECEPTOR PARA PROTEINA DE LA ESTIRPE *F*
CELULA *T*
RECEPTOR PARA KLH
CELULA *T* HIBRIDA
CELULA *T*
RECEPTOR PARA OVAc
RECEPTOR PARA PROTEINA DE LA ESTIRPE *K*
ESTIRPE *F*
ANTIGENO KLH
ESTIRPE *K*
ANTIGENO OVAc
ESTIRPE *F*
ANTIGENO OVAc
ESTIRPE *K*
ANTIGENO KLH

4. DOS TEORIAS INCOMPATIBLES explican por igual el mecanismo que permite a la célula *T* reconocer el antígeno y las proteínas MHC. La teoría del receptor único propone que cada célula *T* posee un solo receptor, capaz de unirse al complejo formado por el antígeno y la proteína MHC (*arriba, a la izquierda*). Según la teoría del doble receptor, cada célula *T* lleva dos receptores distintos, uno para el antígeno y otro para la proteína MHC (*abajo, a la izquierda*). Para comprobar la validez de ambas, los autores construyeron una célula *T* híbrida fusionando dos células *T* normales. Una de las células progenitoras procedía de animales con proteínas MHC de tipo *f*, que habían sido inmunizados contra el antígeno hemocianina de lapa (KLH). La otra célula parental se aisló de animales de la estirpe *k*, inmunizados contra el antígeno ovoalbúmina de pollo (OVAc). Según la interpretación más radical de la teoría del receptor único, la célula híbrida debería reconocer el antígeno KLH sólo en las células de tipo *f*, y el OVAc en las de tipo *k* (*arriba, a la derecha*). De la misma manera, y según la teoría del receptor doble, el híbrido debería reconocer a los dos antígenos en cualquiera de los tipos celulares (*abajo, a la derecha*). Los resultados obtenidos indicaron que las células híbridas se comportaban según la teoría del receptor único. (Los dibujos son obra de Bunji Tagawa.)

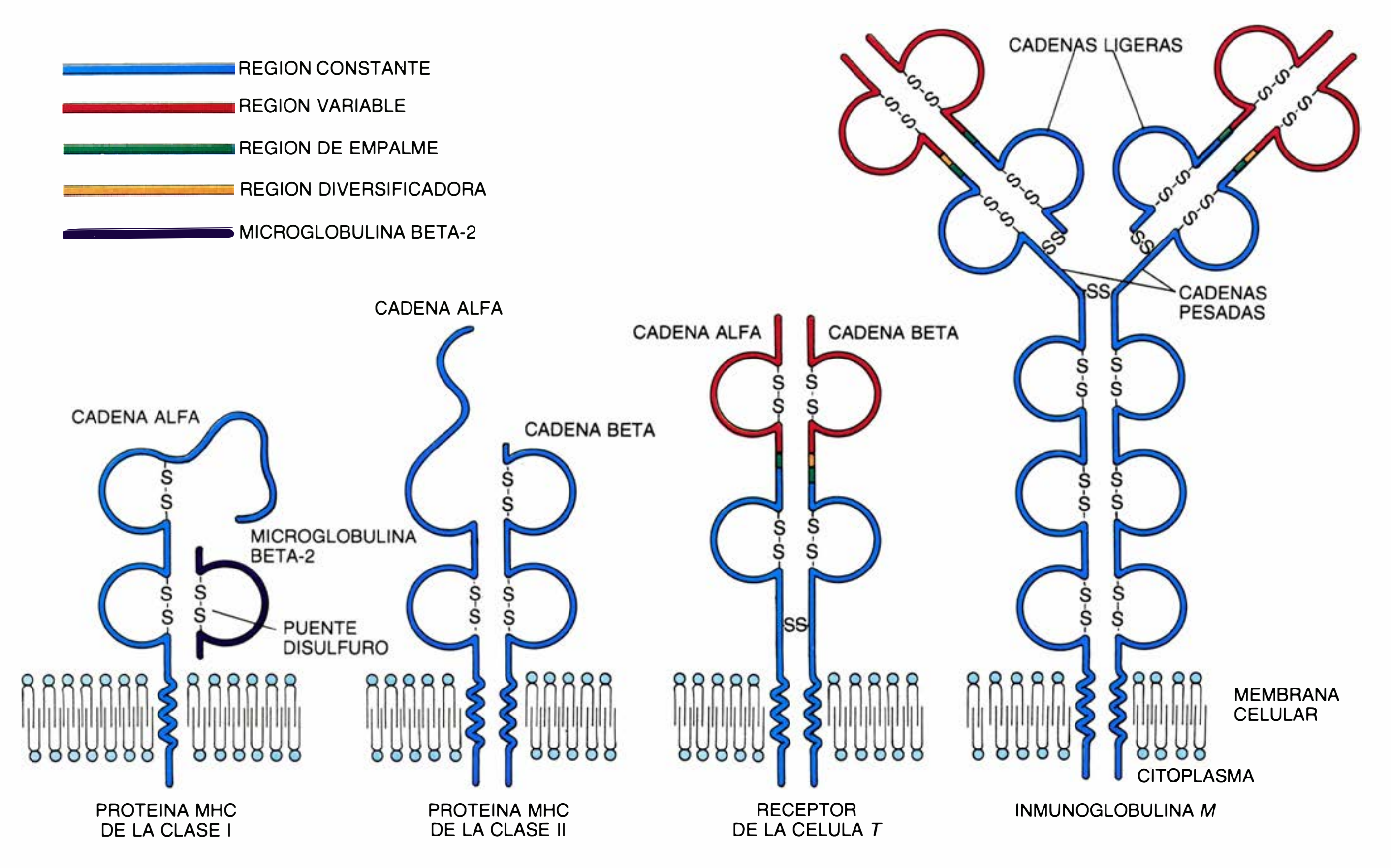
inmediato excretando linfocinas. Tales hibridomas resultan de gran utilidad experimental, pues permiten la inducción y rápida medición de linfocinas en cultivo.

Un anticuerpo de especificidad conocida se consigue inmunizando un animal contra el antígeno pertinente. En el caso del receptor de la célula *T* desconocíamos la identidad del antígeno. Nuestra estrategia, por tanto, consistió en inmunizar ratones contra hibridomas de células *T*, con la esperanza de que ello indujera la producción de anticuerpos capaces de interferir las funciones presumiblemente desempeñadas por los receptores en los hibridomas. A nuestro entender, cualquier anticuerpo contra el receptor se uniría a él y bloquearía su capacidad para enlazarse a OVAc y a la proteína MHC de la estirpe *d*. Se detectaría ese bloqueo porque disminuiría la producción de linfocinas.

Inmunizamos muchos ratones contra grandes cantidades de hibridomas de células *T*, extrajimos suero de cada uno de los ratones, a intervalos determinados después de la inmunización, y ensayamos en cultivo si los sueros bloqueaban la respuesta de los hibridomas frente a células de estirpes *d* y al OVAc. Conseguimos por fin identificiar varios ratones que fabricaban esos anticuerpos. Los antisueros de tales ratones presentaban, además, una interesante propiedad: cuando en los cultivos se utilizaban hibridomas de una especificidad diferente, junto con los antígenos y proteínas MHC para los que eran específicos, los antisueros del ratón no bloqueaban la respuesta de la célula *T*. Repetimos el experimento con otros hibridomas y, en todos los casos, los anticuerpos "bloqueantes" fabricados por los ratones sólo actuaban contra los hibridomas utilizados para inmunizar al ratón.

La especificidad de esos antisueros hacia un determinado hibridoma de célula *T* nos indujo a creer que habíamos logrado producir anticuerpos contra un receptor de célula *T*. Puesto que la única variación entre los clones de células *T* era el receptor, cabía esperar que fuese esa la estructura susceptible de tan específico bloqueo por parte del anticuerpo. Nuestro trabajo, no obstante, no acababa ahí. De cada ratón aislábamos sólo pequeñas cantidades de anticuerpos; se imponía la aplicación del método de Köhler y Milstein para inmortalizar células productoras de anticuerpos.

Kathryn Haskins y Janice White, de



5. ESTRUCTURAS MOLECULARES de las proteínas MHC de las clases I y II, del receptor de la célula *T* y de las inmunoglobulinas, o anticuerpos. Son similares e incluso presentan secuencias de aminoácidos parecidas. Las moléculas se caracterizan por la posesión de bucles de unos 70 aminoácidos en cada cadena. Los átomos de azufre situados en los extremos de los bucles establecen enlaces covalentes. Las proteínas de la clase I se expresan en la superficie de todas las células nucleadas de los vertebrados superiores, asociadas a la proteína microglobulina beta-2, que no es MHC. Las de la clase II se expresan sólo en la superficie de ciertas células, como las *B*. En el receptor de la célula *T* y en las inmunoglobulinas existen regiones variables, de empalme y diversificadoras, cada una de las cuales viene determinada por una secuencia de ADN seleccionada al azar de entre las muchas que existen en el genoma, mecanismo que permite gran cantidad de combinaciones en la formación de las moléculas expresadas por las diferentes células de un animal. Los esquemas no guardan la escala.

nuestro laboratorio, extrajeron células *B* plasmáticas de uno de los ratones inmunes a los hibridomas de célula *T* y OVAc. Por fusión de las células plasmáticas con otras tumorales obtuvieron hibridomas de células plasmáticas, que crecían rápidamente en cultivo y excretaban anticuerpos. Se ensayó la capacidad de esos anticuerpos para bloquear el reconocimiento del OVAc y las proteínas de la clase II de estirpes *d* por parte de los hibridomas de célula *T* y OVAc. Uno de los hibridomas de células plasmáticas presentaba esa propiedad. Casi al mismo tiempo, James P. Allison, a la sazón en el Centro de Oncología de la Universidad de Texas en Smithville, y Stefan C. W. Meuer y Ellis Reinherz, de la Facultad de Medicina de Harvard, obtuvieron anticuerpos similares.

La elucidación de la proteína receptora débese, sobre todo, a la disponibilidad de anticuerpos específicos contra los receptores de células *T*. El fuerte enlace que se establece entre ambos ha permitido la purificación del receptor en cantidad suficiente para revelar sus características moleculares fundamentales. Así, se ha advertido con sorpresa una estrecha semejanza estructural entre la molécula de anticuerpo y el receptor. Ambos constan de dos cadenas polipeptídicas, determinadas por genes distintos, que se mantienen juntas mediante enlaces covalentes establecidos entre dos átomos de azufre [*véase la figura 5*]. Las dos cadenas de que constan los anticuerpos son de distinto tamaño; una se denomina pesada y, la otra, ligera. Ambas contienen una secuencia de aminoácidos relativamente constante en todo el animal, incluso en anticuerpos de distinta especificidad. Cada cadena posee, además, una secuencia de aminoácidos que varía considerablemente entre anticuerpos de distinta especificidad antigénica.

La variabilidad de los anticuerpos que posea un organismo la dicta su genoma. Las cadenas polipeptídicas del anticuerpo constan de tres o cuatro regiones, cada una de las cuales está determinada por un segmento de ADN seleccionado aleatoriamente de entre un juego de genes pertinentes. La multitud de combinaciones posibles a la hora de construir la molécula determina el gran número de anticuerpos que se elaboran.

Por ejemplo, una cadena pesada consta de cuatro regiones de aminoácidos: la región constante, una región de empalme, una región diversificadora y la región variable. La constante está determinada por un solo segmento de ADN, pero existen cuatro segmentos distintos para la región de empalme. De la misma manera, existen más de diez segmentos que determinan regiones diversificadoras y más de 100 para la región variable. El número total de secuencias de aminoácidos distintas que corresponden a las diversas combinaciones es, por tanto, superior a 4000 (4 × 10 × 100). La cadena ligera también se ensambla a partir de combinaciones de segmentos de ADN, aunque en este caso hay que añadir un factor más de variabilidad, resultante de la imprecisión en el punto de contacto entre las regiones de empalme, diversificadora y variable. Según Susumu Tonegawa, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, el número

de moléculas distintas de anticuerpos puede superar los mil millones [véase "Moléculas del sistema inmunitario", por Susumu Tonegawa; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, diciembre de 1985].

En el receptor de la célula *T* las dos cadenas polipeptídicas se denominan alfa y beta. En el ratón, ambas tienen un peso molecular aproximado de 43.000 unidades de masa atómica (uma). En el hombre, la cadena alfa pesa unas 50.000 uma y, la beta, unas 39.000. Comparando las cadenas alfa y beta de diferentes clones de células *T* apreciamos ciertas secuencias fijas de aminoácidos y otras que variaban de un clon a otro.

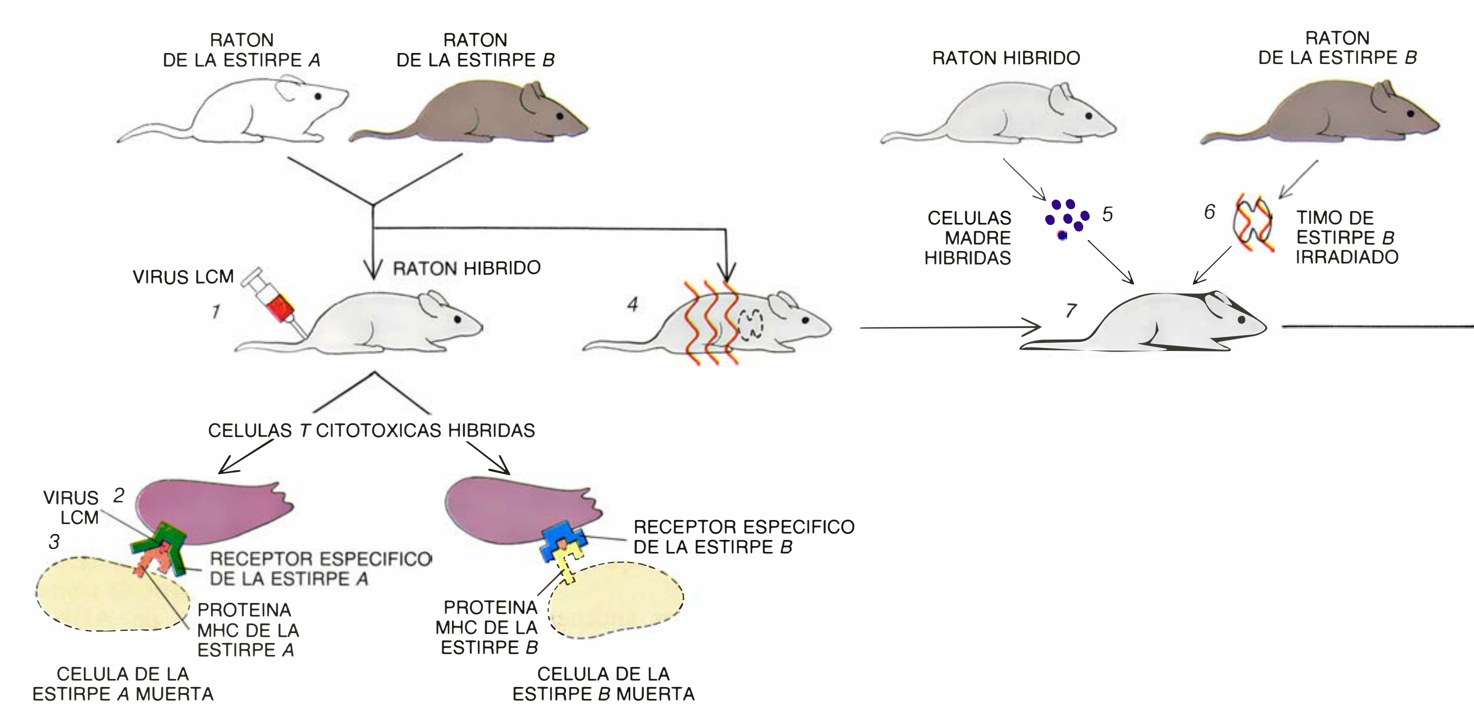
Una vez descubiertas las proteínas que formaban el receptor de la célula *T* cabía aprovechar las nuevas técnicas de la biología molecular para proceder a un estudio más detallado de las mismas. Permiten esas técnicas analizar los genes que determinan una proteína de interés. Dicho análisis revela la estructura de la proteína con mucha más facilidad que los métodos bioquímicos. En nuestro caso, y dadas las similitudes funcionales y estructurales existentes entre los receptores de células *T* y las inmunoglobulinas del sistema inmunitario, parecía probable que los segmentos de ADN que determinaban el receptor de la célula *T* sufriesen una reordenación previa a la expresión de las proteínas correspondientes en la superficie celular, lo mismo que ocurre con los receptores de las células *B*. Pronto empezó la carrera en pos de los genes de los receptores de las células *T*.

Dos grupos describieron simultáneamente los primeros candidatos serios a genes de receptores, el de Stephen M. Hedrick, Mark M. Davis y sus colaboradores, de los Institutos Nacionales de la Salud, la Universidad de California en San Diego y la Universidad de Stanford, y el de Tak W. Mak, del Instituto del Cáncer de Ontario. Ambos, realizando sus trabajos con genes de ratones el primero y con genes humanos el segundo, partieron del supuesto de que las proteínas de los receptores de células *T* se encontraban sólo en esos linfocitos *T* y no, por ejemplo, en los *B*. Con estas premisas, y valiéndose de elegantes técnicas experimentales, consiguieron identificar genes que se expresaban en células *B* o en células *T*, pero no en ambos tipos de linfocitos. Se localizaron primero los genes de la cadena beta y, un año más tarde, los de la cadena alfa. Su análisis ha profundizado en los detalles de la estructura del receptor de la célula *T*.

Las cadenas alfa y beta poseen regiones constantes, variables y de empalme. Se ha confirmado también la existencia de una región diversificadora en la cadena beta, y puede que en la cadena alfa haya otra. Las secuencias de aminoácidos de todas esas regiones son similares a sus análogas en las inmunoglobulinas, aunque de ninguna manera idénticas.

Los grupos de Davis y de Leroy Hood, este último en el Instituto de Tecnología de California, han estudiado la organización de las secuencias de ADN que determinan la cadena beta. Hasta el momento han encontrado unas 12 regiones de empalme, dos regiones diversificadoras (que pueden leerse en cualquiera de las tres posibles fases de transcripción) y aproximadamente 20 regiones variables. Por tanto, el número de combinaciones de secuencias de aminoácidos en la cadena beta es, al menos, de 1440 ($12 \times 2 \times 3 \times 20$). Probablemente la cifra sea bastante mayor, ya que una estimación realista de la variabilidad debe considerar también la existencia de mutaciones e imprecisiones en los empalmes, que afectan al receptor de la célula *T* lo mismo que a la molécula de anticuerpo. La variabilidad de la cadena alfa podría incluso ser mayor, pues aunque no se han detectado todavía regiones diversificadoras parece que el número de regiones variables y de empalme supera, con mucho, el de la cadena beta; quizá haya hasta 100 de cada tipo. Las combinaciones de cadenas alfa y beta pueden generar alrededor de 10 millones de receptores distintos, cantidad que cubre con suficiencia el repertorio conocido de células *T* de cualquier animal.

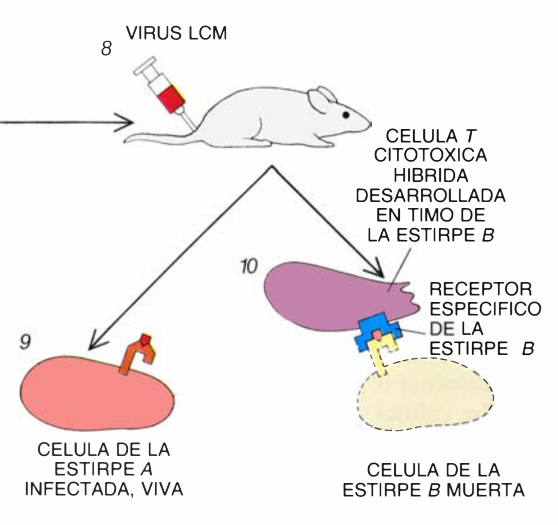
La nueva información estructural



6. EFECTO DEL TIMO sobre las células *T*. Se demostró en un experimento realizado por Rolf Zinkernagel, a la sazón en la Fundación Scripps. A modo de control experimental se utilizó la descendencia híbrida de un cruzamiento entre ratones de estirpes *a* y *b*. Se inmunizaron los híbridos contra el virus LCM (*1*), y de los mismos se aislaron posteriormente células *T* citotóxicas específicas del virus (*2*) capaces de matar las células infectadas por ese virus tanto si procedían de una estirpe de ratones como de la otra (*3*). Para determinar el papel del timo se le extirpó éste a otro ratón híbrido, que se irradió para aniquilar las células *T* y demás células linfoides que ya tuviera (*4*). De otro ratón híbrido se obtuvieron células madre de médula ósea, a partir de las cuales se desarrollan normalmente las células *T* (*5*). Al híbrido timectomizado se le transplantó un timo irradiado procedente de una estirpe *b* de ratón (*6*). De esta manera, las células madre

acerca de esos receptores permite redactar con más precisión muchas de las incógnitas que desde hace tiempo plantea el sistema inmunitario. Se observan, en esencia, tres tipos de fenómenos de reconocimiento para los que puede avanzarse ya una explicación estructural. En primer lugar, la célula *T* no responde a las proteínas MHC propias, es decir, existe autotolerancia hacia lo propio. En segundo lugar, la célula *T* responde a la presencia de un antígeno cuando éste va acompañado de una proteína MHC propia, pero no suele hacerlo si la proteína MHC pertenece a otra cepa de animales. En tercer lugar, en ausencia de antígeno la célula *T* responde también a una proteína MHC foránea; es éste el caso de los rechazos de injertos o transplantes de tejidos. Todo lo cual plantea un problema de índole epigenética: ¿cómo se diferencian, en el timo, los precursores de células *T* en células que han adquirido todas esas propiedades?

La explicación más sencilla de la tolerancia es que algún mecanismo elimina en el timo los clones de células *T* que reaccionan contra las proteínas MHC propias. Se desconoce cómo se lleva a cabo tal selección. Pudiera ser que, en alguna fase de su desarrollo, la célula *T* muriese si sus receptores antigénicos se uniesen a una molécula expresada por las células del propio organismo. Se conoce esta teoría como



híbridas se desarrollaron con el timo de la estirpe *b* (*7*). El híbrido así construido se inmunizó contra el virus LCM (*8*). Las células *T* aisladas a partir de éste no mataban las células procedentes de estirpes *a* de ratón e infectadas con el virus (*9*), pero sí las infectadas que procedían de estirpes del tipo *b* (*10*).

del desarrollo clonal abortivo, y sostiene que, durante el desarrollo de las células *T*, todas aquellas que reaccionaran específicamente con proteínas MHC o antígenos propios se destruirían por el continuo "bombardeo" de tales moléculas. De unirse a esos complejos, las células *T* que reaccionasen específicamente contra proteínas MHC propias asociadas con antígenos foráneos también morirían, pero en un animal no infectado se desarrollarían hasta su total madurez. Sobrevivirán así hasta que un antígeno ajeno invasor desencadenara su respuesta.

La respuesta de la célula *T* a una proteína MHC asociada con un antígeno suscita otros interrogantes. Rolf Zinkernagel y sus colegas y Michael J. Bevan, a la sazón en el MIT, reconocieron la dimensión del problema en sus estudios sobre la "educación" de las células *T* en el timo [*véase la figura 6*]. Cruzaron estirpes de ratón de los tipos *a* y *b* y obtuvieron descendientes híbridos que portaban ambos tipos de proteínas MHC. Extrajeron el timo a los híbridos e irradiaron los animales para matar las células *B* y *T*. Se les transplantó un nuevo timo procedente de una estirpe de ratón *b* y se les injertó nuevas células madre de médula ósea de otro híbrido del mismo tipo.

En un ratón híbrido normal, las células madres híbridas se desarrollarían en células *T* maduras que responderían colectivamente ante antígenos asociados con proteínas MHC de tipo *a* o de tipo *b*. Los animales del experimento, sin embargo, sólo presentaban proteínas de tipo *b* en las células no linfáticas del timo, aunque por el resto del cuerpo quedaban todavía proteínas de ambos tipos. Los investigadores encontraron, con sorpresa, que las células *T* maduras de tales animales respondían al antígeno sólo cuando iba asociado a proteína MHC de tipo *b*, pero no si era de tipo *a*. Parece, por tanto, que durante el desarrollo de las células *T* en el timo de la estirpe *b* se seleccionaron receptores capaces sólo de reconocer antígenos asociados a las proteínas MHC de dicho órgano. Al parecer, las células *T* no reconocieron los antígenos asociados a proteínas MHC ajenas al timo del hospedador.

Muchas hipótesis tratan de dar explicación a esos inesperados hallazgos, si bien ninguna resulta enteramente satisfactoria. Quizá los receptores deban establecer, en el timo, un enlace débil con las proteínas MHC propias antes de que las células *T* maduren y adquieran funcionalidad. Posteriormente, las células *T* que portan receptores con una mayor afinidad por las proteínas MHC propias sufrirían un proceso abortivo en su desarrollo clonal. Las restantes células *T*, dotadas de baja afinidad, si bien detectable, por las proteínas MHC propias, pasarían al torrente circulatorio. Al unirse un antígeno a esas proteínas, la afinidad del receptor de las células *T* circulantes por tal antígeno aumentaría sustancialmente.

¿Cómo se explica la respuesta de las células *T* a los transplantes de tejido foráneo? Lo más probable es que, para la célula *T*, una proteína MHC foránea ofrezca, desde el punto de vista químico, la misma apariencia que el complejo formado por una proteína MHC propia y un antígeno. Varias observaciones apoyan tal interpretación. Por ejemplo, el receptor que se une a la proteína MHC propia parece ser el mismo que lo hace a la foránea. Además, se advierte cierta predisposición del receptor a unirse al antígeno en presencia de proteínas de la clase I o II, pero no de ambas conjuntamente, y ello tanto si la proteína es foránea como si no.

Durante el último año se ha realizado un gran esfuerzo para tratar de averiguar las bases de esas preferencias del receptor. No obstante, hasta hoy nadie ha observado diferencias evidentes entre células *T* específicas de una u otra clase de proteínas MHC. En 1984, Tonegawa y sus colegas descubrieron un tercer tipo de gen, denominado gamma, que también sufre reorganizaciones en las células *T*. La secuencia de ese gen sugiere que la proteína que determina no forma parte del receptor, según se describe éste en la actualidad. No obstante, dicha proteína se expresa sólo en células *T* citotóxicas y puede, por tanto, que contribuya de alguna manera a la especificidad MHC de la célula que la lleva.

Si existen semejanzas de tipo químico entre proteínas MHC foráneas y el complejo formado por una proteína MHC propia y un antígeno, cabe esperar que el componente antigénico del complejo sea muy pequeño, y que encaje con más facilidad que uno grande en el sitio de unión del receptor. Trabajos recientes de varios grupos, entre los que se cuentan los de Emil Unanue y sus colegas, Ronald H. Schwartz y sus colaboradores, del Instituto Nacional de la Alergia y Enfermedades Infecciosas, y el nuestro, en colaboración con Howard M. Grey, del Centro Judío de Inmunología y Medicina del Aparato Respiratorio, han demostrado que el componente antigénico del complejo es, en efecto, pequeño. Nuestro

equipo, por ejemplo, ha encontrado que las células *T* responden a células vivas incubadas con un antígeno, pero no si el antígeno se añade después de fijar las células con un agente químico. Si a esas células fijadas se les añade sólo un pequeño fragmento del antígeno, la célula *T* recupera la capacidad de respuesta. Tales trabajos confirman que las células que presentan el antígeno, a las cuales se unen las células *T*, ya han alterado o digerido el antígeno.

Debemos abordar un último punto. Las células *B* ponen de manifiesto la existencia de sistemas en los que un receptor es capaz de reconocer y unirse a un antígeno libre. La unión suele conducir a la expansión clonal y diferenciación de la célula *B*, que elabora anticuerpos que contribuyen eficazmente a la destrucción del antígeno. ¿Por qué, entonces, la célula *T* ha desarrollado un sistema tan complejo de reconocimiento de antígenos que sólo actúa si van asociados a productos del MHC?

Cabe dar una respuesta teleológica a dicha pregunta. La célula *T* tiene como fin reaccionar exclusivamente contra los antígenos dispuestos sobre células, no contra antígenos libres. Las células *T* citotóxicas, por ejemplo, están diseñadas para matar células infectadas por virus e inhibir, por tanto, el crecimiento y expansión del virus. Tales células no pueden matar partículas víricas libres. Se malgastarían las existencias de células *T* de no disponerse de mecanismos que dirijan su atención contra los virus que se estén desarrollando en células nucleadas. El sistema inmunitario ha diseñado al receptor de la célula *T* de tal manera que sólo se una al antígeno vírico si puede hacerlo también a una proteína MHC de la clase I propia, polipéptido que se encuentra en la superficie de todas las células nucleadas del organismo.

Dando prueba de una astucia superior, el sistema inmunitario ha diseñado receptores para las células *T* coadyuvantes destinados a interactuar en primera instancia con las células *B* y con otras células del sistema inmunitario. Esos receptores sólo se unen a los antígenos tras asociarse éstos a proteínas MHC de la clase II propias, que únicamente se expresan en la superficie de las células *B* y de las restantes células inmunitarias. El sistema inmunitario se ha desarrollado por evolución en el sentido de que ambas clases de proteínas MHC hagan las veces de indicadores. Guían a las células *T* hacia el antígeno precisamente en aquellos lugares donde su acción puede resultar más eficaz.

Reacciones quimiocuánticas en la región del frío intenso

Los efectos mecanocuánticos permiten que algunas reacciones, prohibidas clásicamente, se realicen a temperaturas cercanas al cero absoluto. ¿Se hallarían entonces las semillas de la vida en el interior de nubes de polvo galáctico?

Vitalii I. Goldanskii

De nuestra experiencia diaria sabemos que las reacciones químicas avanzan más lentamente a bajas temperaturas. La carne, por ejemplo, puede guardarse congelada, hecho que conocían ya los pueblos más primitivos. Hace apenas un siglo, el quimiofísico sueco Svante Arrhenius propuso una ley asociada a la química clásica que relacionaba la velocidad de una reacción química con la temperatura. De acuerdo con la ecuación de Arrhenius, en el cero absoluto (es decir, a cero grados Kelvin o menos 273 grados centígrados) la velocidad de todas las reacciones químicas debe ser nula, que es lo mismo que decir que las reacciones se detendrán.

La observación experimental, sin embargo, demuestra que, si bien la ecuación de Arrhenius suele describir con precisión la velocidad de reacción química a temperaturas relativamente altas, falla en la región de bajas temperaturas. En ésta, entra en juego el efecto mecanocuántico conocido por efecto túnel y permite reacciones químicas prohibidas por la teoría clásica. En concreto, átomos enteros pueden atravesar, gracias al efecto túnel, las barreras opuestas por las fuerzas repulsivas de otros átomos y formar moléculas complejas, aun cuando los átomos involucrados no tengan la energía necesaria, desde el punto de vista de la química clásica, para vencer dicha repulsión. Aunque la velocidad con que tales moléculas complejas pueden formarse es obviamente muy pequeña, los procesos asociados al efecto túnel llegan a desempeñar un papel importante.

En este sentido, sugerí la posibilidad de describir una prehistoria fría del origen de la vida: la formación de moléculas orgánicas bastante complejas en las regiones más frías del espacio exterior, donde las temperaturas no se elevan más allá de unos pocos grados Kelvin. Los rayos cósmicos (protones y otras partículas de alta energía) pueden desencadenar la síntesis de dichas moléculas en las nubes oscuras de polvo interestelar. Después de este inicio, las reacciones pueden continuar, lenta pero inexorablemente, gracias al efecto túnel. En el mismo año de mi propuesta (1973), dos físicos británicos, Fred Hoyle y N. C. Wickramasinghe, argumentaron que, posiblemente, las moléculas de formaldehído interestelar evolucionaron en polisacáridos estables como la celulosa y el almidón. Sus conclusiones, aunque objeto de duro debate, han despertado un vivo interés entre los investigadores que consideran las nubes galácticas como los lugares donde aconteció la evolución prebiótica de los compuestos necesarios para la vida.

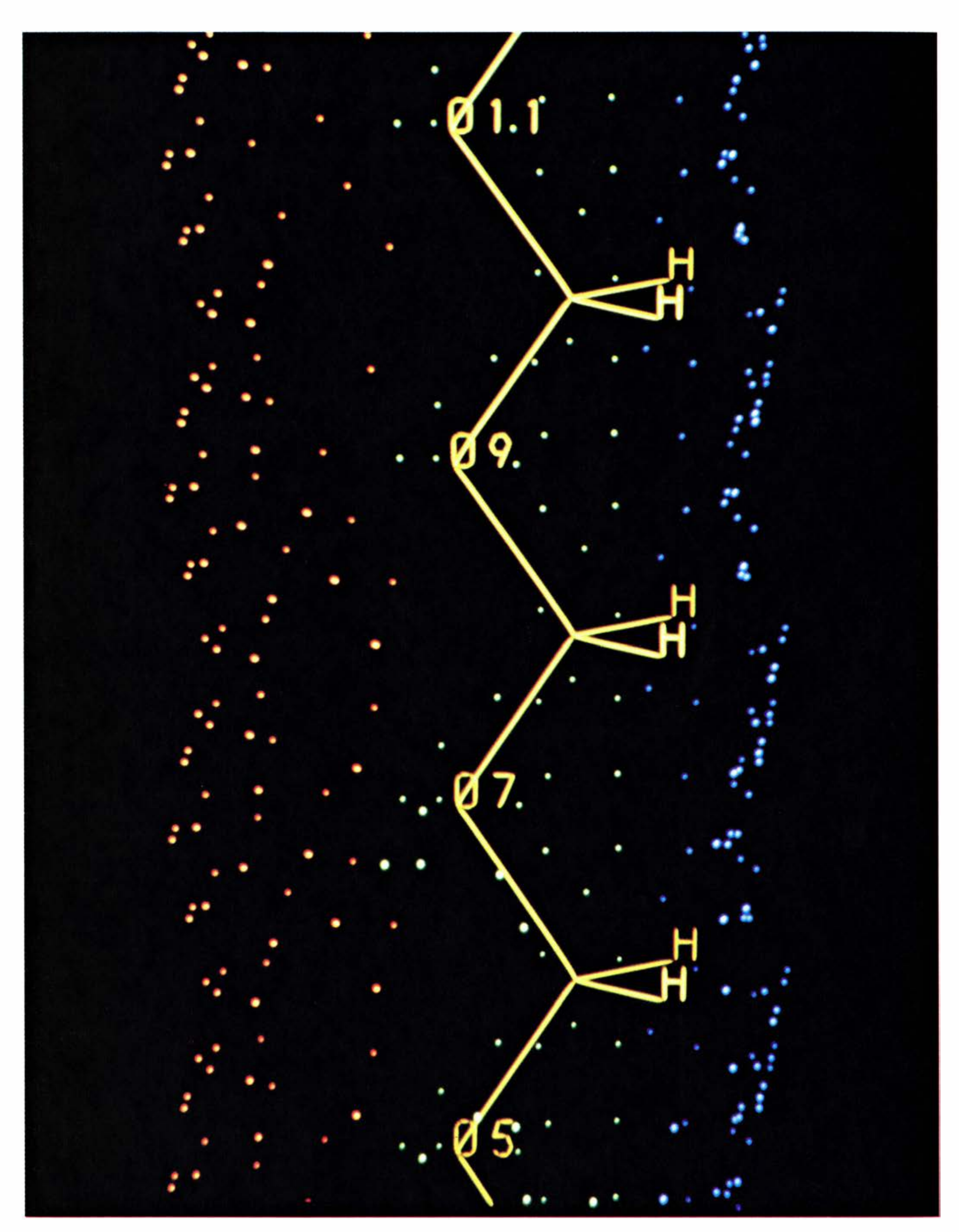
No es mi intención afirmar o negar las ideas de Hoyle y Wickramasinghe. Quisiera indicar, de todos modos, que si el formaldehído interestelar ha evolucionado hacia otras estructuras más complejas, lo habrá hecho, sin duda alguna, mediante procesos asociados al efecto túnel. Al hablar del papel de la química de las reacciones frías en la evolución de los compuestos prebióticos, es conveniente recordar las palabras con las que el poeta ruso Vladimir Mayakovski saludó al poeta y novelista Aleksandr Pushkin: "La eternidad es nuestra, ¿por qué no perdemos un par de horas?"

La velocidad de toda reacción química, fría o caliente, depende de una característica muy importante, llamada energía de activación. ¿En qué consiste ésta? Supongamos que toda molécula reside en el fondo de un pozo de energía potencial. La profundidad y la anchura del pozo dependerán de la disposición espacial de los átomos que constituyen la molécula, la cual puede cambiar a lo largo de una reacción química. Una reacción química, por tanto, corresponde a la transición de una molécula desde el fondo de un pozo de potencial al fondo de otro. Desde un punto de vista clásico, una transición de este tipo sólo puede realizarse pasando por encima de una barrera de activación, o potencial, entre los pozos, cuya altura recibe el nombre de energía de activación de la reacción. A mayor energía de activación, menor velocidad de reacción.

Las energías de activación habituales superan, unas diez veces por lo menos, las energías térmicas de las moléculas de nuestro mundo entorno, donde la temperatura es de unos 300 grados Kelvin. A la temperatura del helio líquido –4,2 grados–, las energías de activación multiplican por mil, si no más, la energía térmica molecular. Así pues, de acuerdo con la química clásica muchas reacciones no tendrían lugar ni a la temperatura ambiente ni a la del helio líquido, salvo que las moléculas recibieran una energía adicional. En cierto modo, la situación se parece a una lotería: antes de ganar cualquier premio se precisa tener dinero para pagar la participación.

Sin embargo, se puede ganar sin preocuparse de comprar un décimo, por decirlo así, siempre que las moléculas que reaccionan puedan encontrar un paso, un túnel desde el fondo de un pozo de potencial hasta otro más profundo, sin tener que saltar por encima de la barrera que separa los dos pozos (energía de activación).

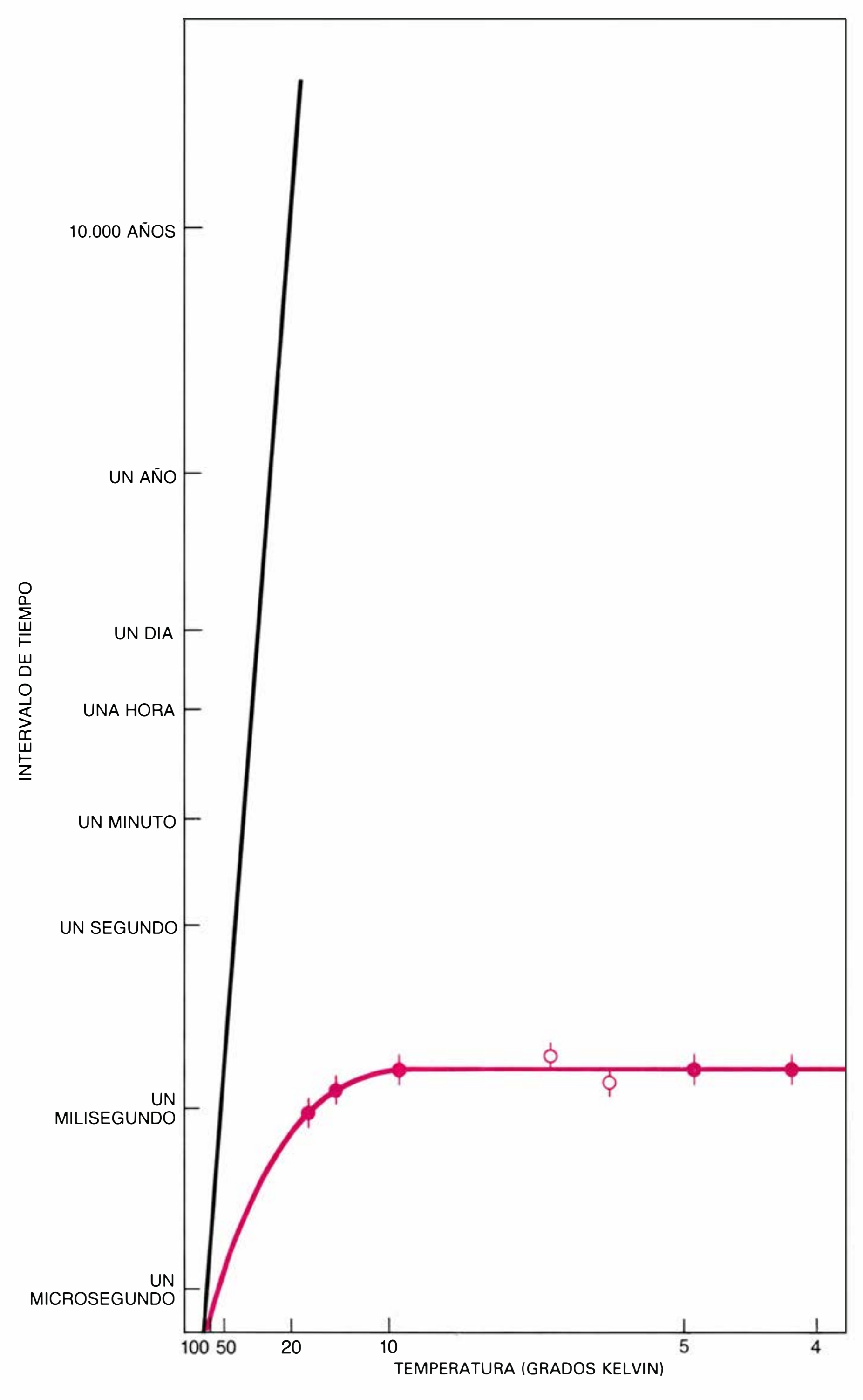
El efecto túnel es el resultado directo de un principio básico de la teoría cuántica: la dualidad onda-corpúsculo que abarca toda la materia y radiación.



1. POLIMERO DE FORMALDEHIDO, larga cadena de monómeros o moléculas individuales que se sintetizan a las temperaturas del helio líquido (4,2 grados Kelvin, 269 grados Celsius). De acuerdo con las leyes de la química clásica, la mayoría de las reacciones deberían detenerse a temperaturas tan bajas; la síntesis de polímeros de formaldehído es el resultado de un efecto mecanicocuántico llamado efecto túnel. En el frío intenso del espacio, el formaldehído podría evolucionar hasta compuestos orgánicos tan complejos como la celulosa y el almidón. En esta imagen, construida mediante ordenador, preparada por Paul Weiner y sus colegas de la Universidad de Rutgers, los puntos rojos alrededor de los átomos de oxígeno (*O*) representan puntos de potencial negativo y los puntos azules alrededor de los átomos de hidrógeno (*H*) y de los de carbono (*vértices sin ningún tipo de identificación*) señalan la región de potencial positivo.

En el entorno familiar del mundo macroscópico, tal dualidad, aunque no está suprimida, permanece en el transfondo de los fenómenos y no suele ser detectable. Es en el microcosmos, el dominio de las reacciones químicas, donde los efectos mecanocuánticos adquieren una relevancia especial. De este modo, el comportamiento de "partículas" tales como átomos y moléculas está a menudo dominado por sus características ondulatorias.

El efecto túnel cuántico de una partícula a través de una barrera de activación goza de una alta posibilidad de producirse siempre y cuando la anchura de la barrera sea menor que la longitud de onda característica de la partícula en cuestión. El fenómeno es análogo al que se presenta cuando un haz de luz se proyecta sobre la superficie de un material opaco. Parte de la luz se refleja y parte es absorbida por el medio. Si el medio opaco es suficientemente delgado, la parte penetrante de la onda aparecerá en la cara opuesta.



2. SINTESIS DE POLIMEROS: requeriría un intervalo de tiempo mayor a menor temperatura (*línea negra*), de acuerdo con la ley de la química clásica conocida por ecuación de Arrhenius. En el cero absoluto (273 grados Kelvin), el tiempo se acercaría a infinito y la reacción se detendría. En realidad, el tiempo necesario (*curva de color*) es finito; en otras palabras, la reacción se realiza aun cuando lo haga lentamente. Como se muestra aquí, el tiempo necesario para agregar una molécula a la cadena que va desarrollándose se mantiene constante, alrededor de los 10 milisegundos, para temperaturas cercanas a los 10 grados Kelvin.

La teoría del efecto túnel obtuvo uno de sus primeros éxitos en 1928, cuando George Gamow recurrió a ella para explicar cuantitativamente las velocidades de desintegración de ciertos elementos radiactivos. Al cabo de un año, David G. Bourgin, de la Universidad de Illinois, propuso la hipótesis según la cual la barrera de activación de las reacciones químicas podría atravesarse mediante un mecanismo de efecto túnel. Mientras trabajaba en la Universidad de Oxford, Ronald P. Bell realizó múltiples y valiosas contribuciones para una mayor comprensión del efecto túnel en las reacciones químicas. En particular, dedujo las ecuaciones que permiten calcular la probabilidad de que una partícula atraviese barreras de tipos y formas distintos. Sus predicciones se verificaron después en reacciones que ocurrían a temperaturas bastante altas, características de la fase líquida de los materiales.

Más recientemente, los investigadores se han preocupado por hallar las manifestaciones del efecto túnel a bajas temperaturas. En tales condiciones, el número de transiciones atribuibles al efecto túnel a través de la barrera de activación sobrepasa el número de transiciones clásicas de Arrhenius por encima de la barrera. En un trabajo escrito en 1959, el autor introdujo la noción de temperatura de penetración: aquella temperatura por debajo de la cual las transiciones por debajo de la barrera, las debidas al efecto túnel, sobrepasan a las transiciones por encima, las transiciones de Arrhenius; la mecánica clásica cede entonces el paso a su contrapartida cuántica.

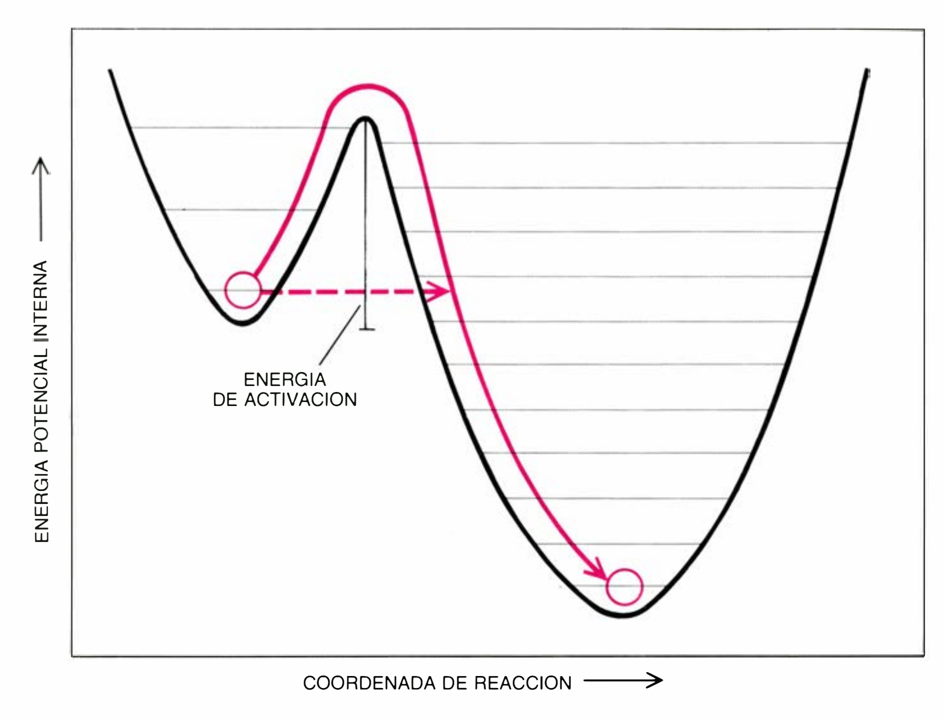
A modo de ejemplo, supongamos que la altura de una barrera de activación es de 0,4 electronvolt (una energía de activación común en muchas reacciones químicas) y que su anchura es de unos dos angstrom, el diámetro aproximado de un átomo. (Un angstrom es una cienmillonésima de centímetro.) En este caso, la temperatura de penetración por efecto túnel de un átomo de hidrógeno se acerca a los 160 grados Kelvin; para el deuterio, el isó-

topo pesado del hidrógeno, esa temperatura es de 120 grados. Si de moléculas y átomos más pesados se trata, la temperatura de penetración es aún más baja, ya que desciende proporcionalmente a la raíz cuadrada de la masa de la partícula. Ello explica por qué razón, para efectuar observaciones significativas y válidas del efecto túnel en las reacciones químicas, debe trabajarse en las regiones criogénicas.

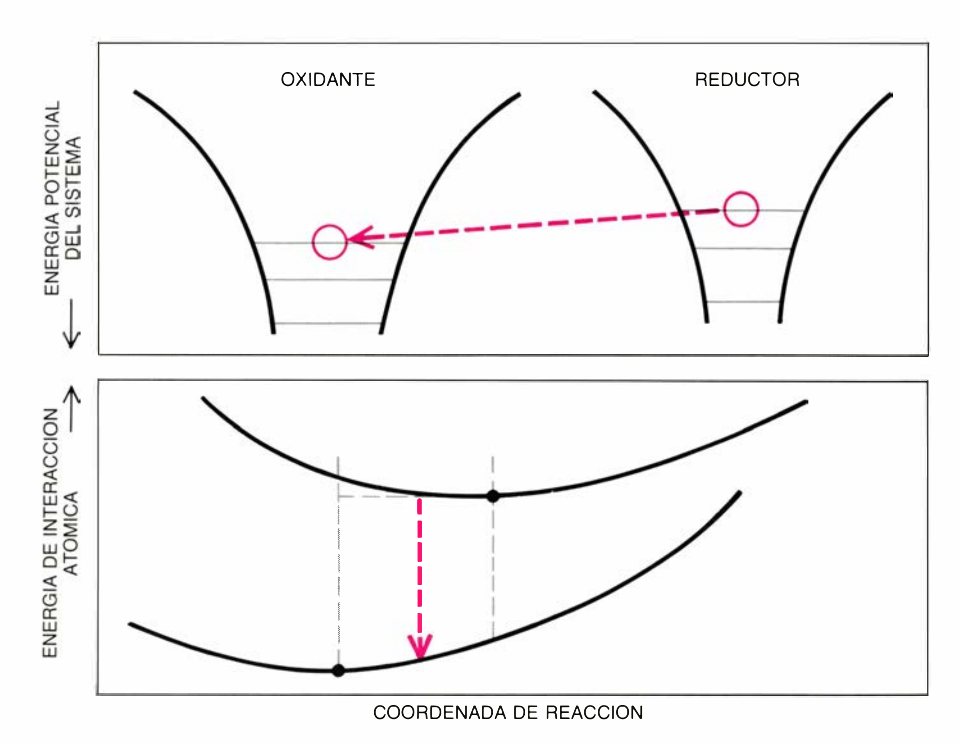
A bajas temperaturas se observa también otro fenómeno. Cerca del cero absoluto, todas las moléculas se mueven hacia el nivel de energía fundamental, o energía del punto cero, es decir, caen hacia la base de la barrera de activación, donde es máxima la distancia entre los pozos de potencial. Debido a que la distancia permanece finita a medida que la temperatura desciende, la probabilidad de penetración por efecto túnel va adquiriendo un nivel finito e independiente de la temperatura. Cuando esto ocurre, la velocidad de reacción ha llegado a su límite cuántico de baja temperatura. El autor dedujo y analizó también la existencia de un límite así en el mismo trabajo de 1959. La penetración mediante efecto túnel a través de la barrera de energía de activación no conlleva necesariamente la aparición de un límite de baja temperatura para la velocidad de reacción. La existencia del límite indica, de todas maneras, que a bajas temperaturas los efectos mecanocuánticos prevalecen sobre los clásicos y que la penetración mediante efecto túnel desempeña un papel decisivo.

¿Qué misión cumple el efecto túnel en las reacciones redox? Esta clase importante de procesos, que forma la rama más antigua de la química, puede describirse a grandes rasgos como la transferencia de un electrón de una especie química a otra. El átomo o la molécula que cede electrones se denomina reductor, o dador de electrones, y oxidante, o aceptor de electrones, el átomo o molécula que acepta electrones. (En términos generales, un ácido es oxidante y, reductora, una base.)

Por decrecer la temperatura de penetración proporcionalmente a la raíz cuadrada de la masa de la partícula que efectúa el proceso y debido a que la masa del electrón es unas 2000 veces menor que la de un protón, cabría esperar que la temperatura de penetración de un electrón se acercara a los 7000 grados Kelvin. Habría que concluir, por tanto, que todas las reacciones redox se desarrollarían sólo me-



3. EFECTO TUNEL entre pozos de potencial; puede permitir que algunas reacciones químicas se lleven a cabo aunque estén prohibidas. Los pozos de potencial corresponden a diversos tipos de ordenación de los átomos en una molécula. La energía interna de cada ordenación atómica (*eje de ordenadas*) varía con la coordenada de reacción, o distancia entre átomos de la molécula (*eje de abcisas*). La propia molécula puede imaginarse residiendo en el fondo de uno de los pozos. Ya que la energía de una molécula cambia durante el transcurso de una reacción química, la reacción puede representarse como una transición de una molécula desde el fondo de un pozo de potencial hasta el fondo del otro. Una transición de esta naturaleza se ve impedida por una barrera de energía denominada energía de activación. De acuerdo con la química clásica, una molécula puede moverse de un pozo a otro únicamente saltando por encima de la barrera (*línea continua de color*). Desde el punto de vista de la mecánica cuántica, sin embargo, la molécula puede atravesar la barrera gracias al efecto túnel (*línea a trazos de color*), y ello incluso en la región de muy bajas temperaturas. Las líneas grises indican los niveles de energía permitidos en la descripción mecanocuántica de la molécula.



4. UNA REACCION REDOX consiste en la transferencia de un electrón desde un reductor (un átomo o una molécula que cede electrones) hacia un oxidante (un átomo o una molécula que acepta electrones). La ilustración superior muestra el efecto túnel de un electrón de valencia, externo, de un reductor a un oxidante. Los pozos de potencial débense a la atracción del electrón, cargado negativamente, por los núcleos, cargados positivamente, de las dos especies químicas. La ilustración inferior esquematiza la interacción atómica en el reductor antes de perder un electrón (*curva superior*) y después de haber perdido uno (*curva inferior*). La transferencia del electrón se representa por la línea coloreada. La reacción, exotérmica, desprende calor.

diante efecto túnel. El hecho de que no sea así tiene una explicación sencilla. En contraste con el movimiento de los electrones libres en los metales, superconductores y otros conductores, el movimiento de electrones en las reacciones redox está débilmente unido al movimiento de los núcleos atómicos (mucho más pesados).

El desplazamiento de las partículas en este proceso recuerda el avance de un tren integrado por una locomotora ligera unida a un vagón pesado mediante un conector elástico que se estira fácilmente. El electrón sería la locomotora y, el núcleo, el vagón: aunque el electrón recorra cierto intervalo antes que el núcleo se mueva, las dos partículas permanecen unidas. La temperatura de penetración del electrón depende, por tanto, de la masa de ambos, electrón y núcleo, y como tal se encuentra por debajo de los 200 grados Kelvin.

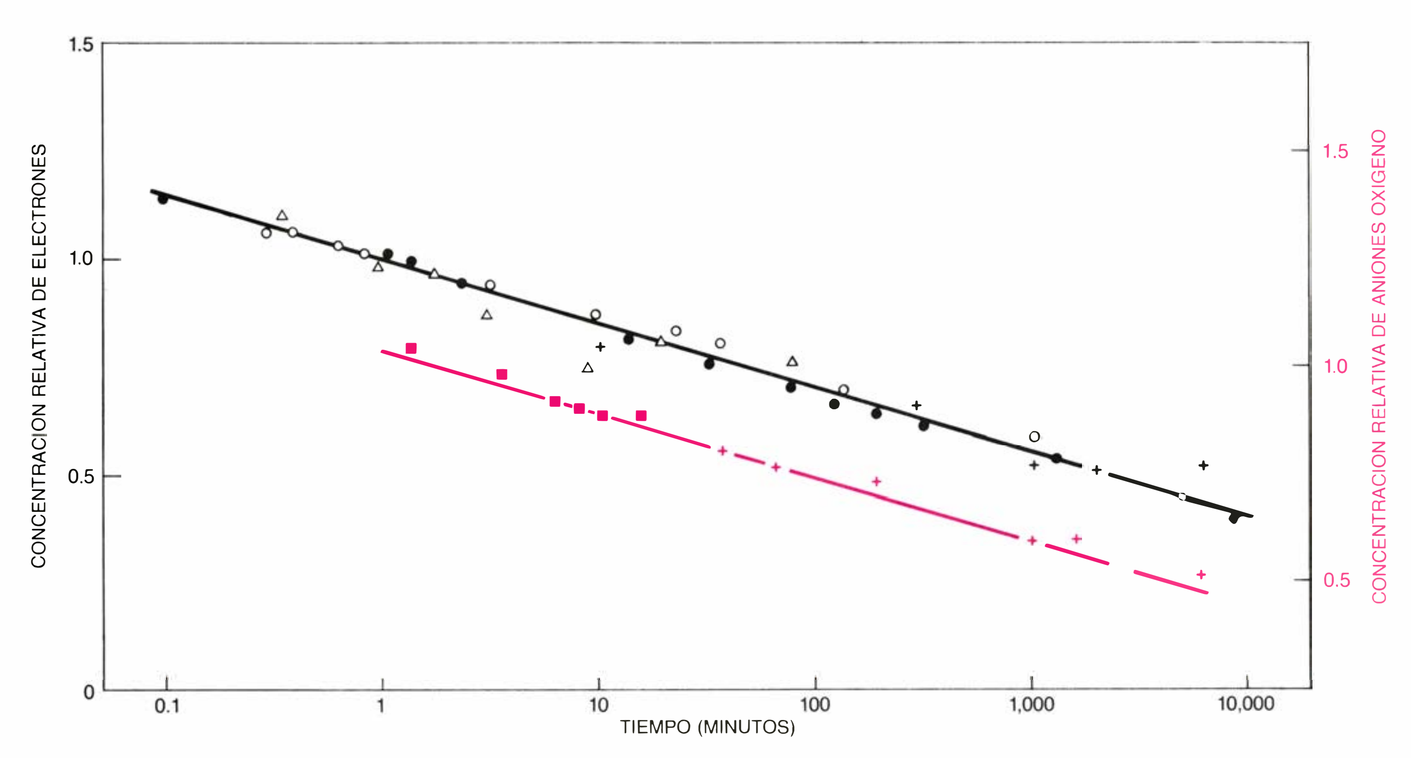
La primera demostración incuestionable de que el efecto túnel desempeña un papel importante en las reacciones redox a bajas temperaturas débese a Britton Chance y Don C. DeVault, de la Universidad de Pennsylvania. En 1966, oxidaron (añadieron electrones) el citocromo *c* mediante reducción (restando electrones) de la clorofila. El citocromo *c* es una enzima que transporta electrones al oxígeno molecular a través de sucesivas oxidaciones y reducciones. Los investigadores vieron que la velocidad de la reacción bajaba de nivel hasta 120 grados Kelvin, permaneciendo luego constante hasta la temperatura más baja examinada, 4,2 grados, temperatura del helio líquido. Calcularon que la energía de activación era de 0,14 electronvolt y que la penetración de la barrera mediante efecto túnel ahondaba unos 30 angstrom. Tal distancia corresponde a las dimensiones lineales de un glóbulo de proteína.

En el Instituto de Quimiofísica de Moscú, el autor y sus colegas Kiril I. Zamarayev, Alpha I. Mikhailov y Ravil F. Khairutdinov iniciaron la investigación de un buen número de reacciones redox que involucraran efecto túnel de electrones entre iones separados por varias decenas de angstrom. Estudiaron la recombinación de los electrones y los aniones oxígeno, O^{-}, que da como resultado la formación de iones O^{2-}. Una solución congelada de hidróxido sódico (NaOH) ionizado hacía el papel de dador de electrones. Desencadenaron las reacciones irradiando la solución, y controlaron la formación de O^{2-} aplicando resonancia paramagnética electrónica.

En esta técnica, análoga a la resonancia magnética nuclear, se observa la respuesta de los electrones dentro de un campo magnético a frecuencias discretas de radiación. Se observó que la velocidad de formación de iones O^{2-} permanecía constante en el intervalo de temperaturas comprendido entre 120 y 4,2 grados Kelvin. La constancia de la velocidad de reacción sirvió para demostrar que la reacción se desarrollaba por efecto túnel. Se estimó que la profundidad de penetración en el efecto túnel comprendía entre 30 y 40 angstrom. También se estudiaron ejemplos del efecto túnel en las reacciones redox, más peculiares todavía.

Hasta aquí sólo hemos abordado la transferencia por efecto túnel de electrones. Pero una reacción química, en su sentido más amplio, constituye un proceso que reordena átomos a la vez que cambia la naturaleza, longitud y ángulos de los enlaces de valencia que los mantienen unidos.

La existencia de un límite cuántico de baja temperatura para la velocidad de las reacciones consideradas en ese sentido amplio fue descubierta por el autor y sus colegas Igor M. Barkalov, Anatoli M. Kaplan y Dmitrii P. Kiryukhin, en el Instituto de Quimiofísica de Moscú. Estudiaron la formación de largas cadenas de moléculas a partir de monómeros de formaldehído (CH_2O).

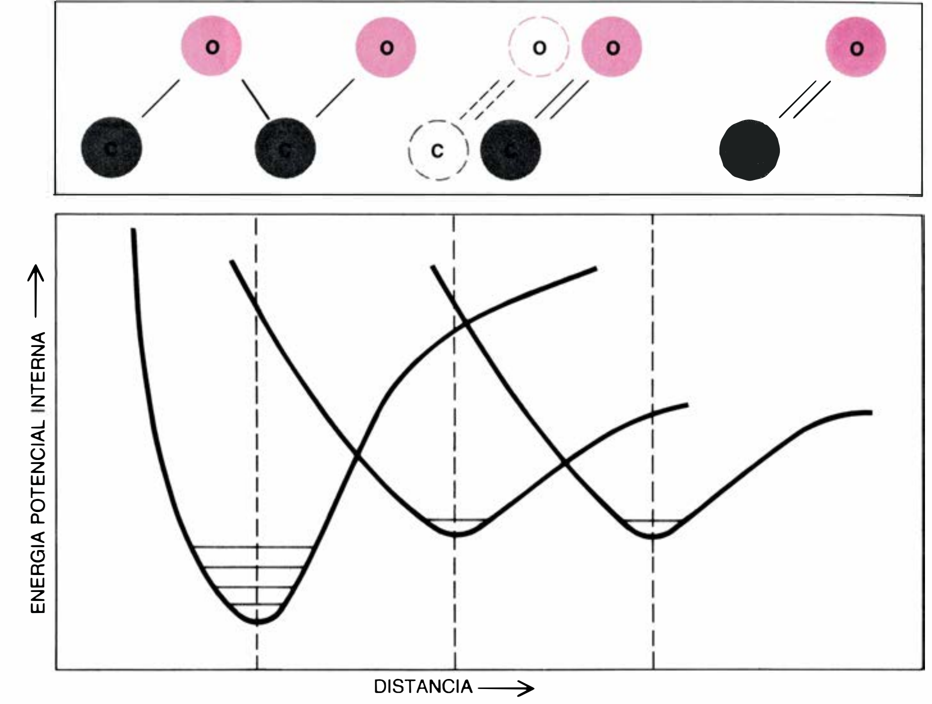


5. VELOCIDAD DE UNA REACCION REDOX medida en el caso de la recombinación de electrones con aniones de oxígeno, O^{-}, para formar aniones O^{2-} (una especie cargada doblemente negativa). Una solución congelada de hidróxido sódico ionizado (NaOH) era el dador de electrones. Se concluyó que los aniones O^{2-} se estaban formando porque la velocidad de desaparición de los electrones (*línea negra*) igualaba la velocidad de disminución de la concentración de aniones O^{-} (*línea de color*). (Las concentraciones de los reactivos se normalizaron de acuerdo con sus valores iniciales; las escalas verticales están algo desplazadas para evitar la superposición.) Los símbolos distintos corresponden a medidas realizadas a diferentes temperaturas, variando de 120 a 4,2 grados Kelvin. El hecho de que la velocidad de recombinación permaneciera constante a lo largo de todo el margen de temperaturas indicaba que la reacción producíase merced al efecto túnel. Recuérdense que, en una reacción clásica, sería de esperar que la velocidad de reacción decreciera con el descenso de la temperatura.

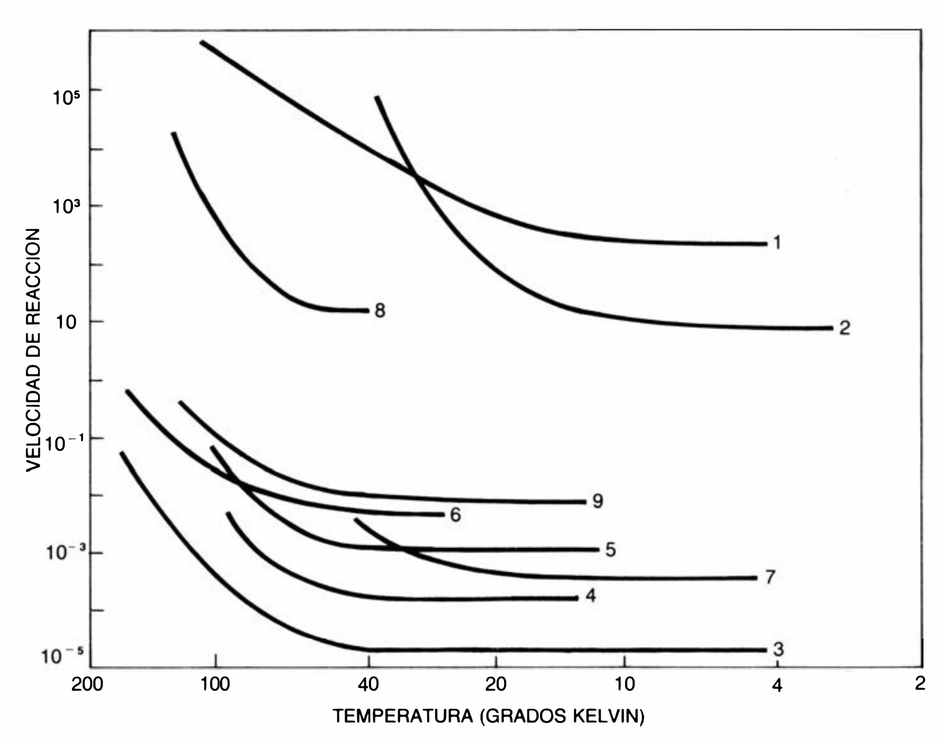
Desencadenaron el crecimiento de tales cadenas con un doble mecanismo: haces de electrones de alta energía provenientes de un acelerador de partículas y rayos gamma (radiación de alta energía) emitidos por átomos de cobalto 60 radiactivo. Una vez iniciado, el crecimiento de las cadenas procede de forma espontánea y no requiere una provisión ulterior de calor.

Se trabajó sobre un amplio intervalo de temperaturas criogénicas que variaba entre 140 y 4,2 grados Kelvin. Midiendo con un calorímetro la cantidad de calor producido por la reacción, se determinó la velocidad de reacción. Se vio que podían producirse cadenas moleculares muy largas a partir de unidades moleculares (monómeros) de formaldehído. A 140 grados, las cadenas estaban formadas por unos 10 millones de unidades monoméricas; a 77 grados eran de unas 100.000 unidades; y cerca de los 4,2 grados Kelvin se encontraban entre 1000 y 2000 unidades. A temperaturas algo por encima de los 140 grados, el tiempo medio requerido para la adición de un nuevo monómero a una cadena en crecimiento se incrementaba con el descenso de la temperatura, de acuerdo con la ecuación clásica de Arrhenius. A temperaturas muy por debajo de los 140 grados, sin embargo, el incremento de este tiempo medio se frenaba progresivamente hasta que, a 12 grados, se llegaba al límite cuántico de baja temperatura, una centésima de segundo. A 4,2 grados, la velocidad de reacción era 110 órdenes de magnitud mayor que la que cabría esperar si la ecuación de Arrhenius fuera correcta. Tales resultados están en muy buen acuerdo con el hecho de que la reacción se realice mediante el efecto túnel de monómeros de formaldehído. Una molécula penetra la barrera desde un pozo de potencial relativamente poco profundo, producido por la interacción con las moléculas circundantes, hasta una posición adyacente asociada a un pozo de potencial más profundo. La molécula que sufre el efecto túnel forma el eslabón final de la cadena de formaldehído, donde emerge en una posición energéticamente más estable, acompañada por la liberación de 0,4 electronvolt de energía y su posterior disipación.

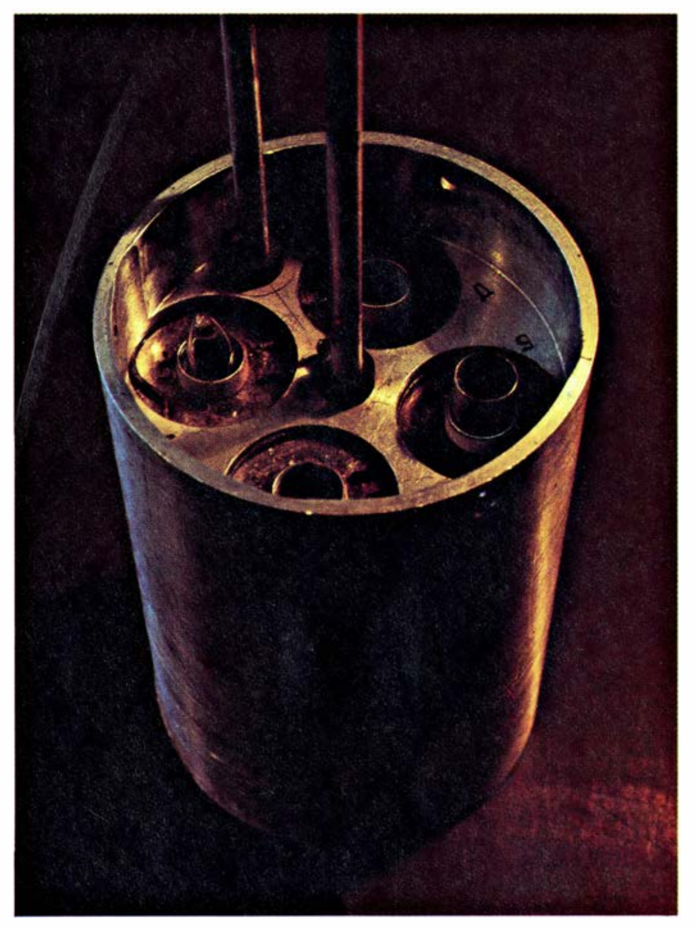
El crecimiento de cadenas de formaldehído mediante efecto túnel puede compararse a la fisión espontánea de los núcleos. Como pone de relieve el análisis teórico del efecto túnel, la probabilidad de penetración de barrera es inversamente proporcional al producto de la anchura de la misma, a

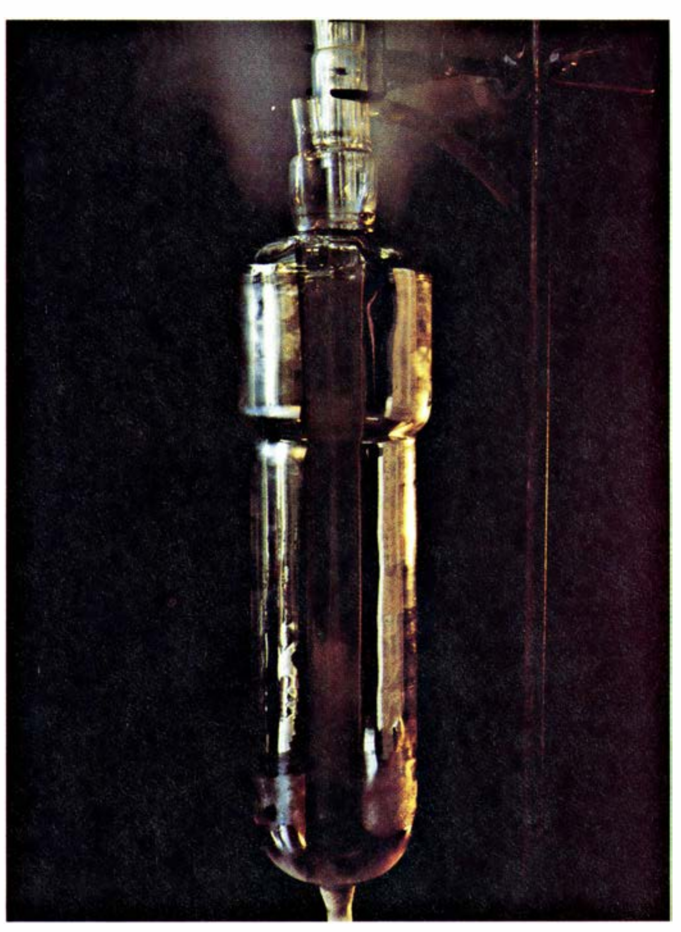


6. EL EFECTO TUNEL MOLECULAR de un monómero de formaldehído (*arriba, a la derecha*) puede llevar a la formación de una cadena polimérica (*arriba, a la izquierda*). El formaldehído consta de un átomo de oxígeno (*O*) y dos átomos de hidrógeno (*H*), unidos los tres a un átomo de carbono (*C*). (Los dos átomos de hidróyeno no se muestran aquí.) El complejo de la mitad de la secuencia superior ilustra el paso intermedio del proceso: la rotura del doble enlace entre átomos de oxígeno y átomos de carbono para permitir la formación de los enlaces simples –C–O–C–O– del polímero. La parte inferior de la ilustración describe los pozos de energía potencial en cada estadio. La repetición del proceso prolonga la longitud del polímero.



7. LIMITES DE LA VELOCIDAD DE REACCION a bajas temperaturas. Ponen de manifiesto que se ha producido el efecto túnel. Tales límites se han observado para muchas reacciones químicas: (*1*), el crecimiento de las cadenas poliméricas de formaldehído (1973); (*2*), el reenlace del monóxido de carbono con la hemoglobina (1975); (*3*), la isomerización, o reorganización estructural, de pares radicales en la dimetilglioxima, tras la irradiación con rayos gamma (1977); (*4, 5*), la abstracción por radicales metilo de átomos de hidrógeno del metanol helado (*4*) y del etanol (*5*) (1977); (*6*), la transferencia de átomos de hidrógeno durante la isomerización de ciertos radicales (1978); (*7*), la formación de enlaces carbono-carbono en ciertos radicales (1979); (*8*), la adición de ácido bromhídrico al etileno (1978), y (*9*) la cloración del cloruro de butilo mediante cloro molecular (1980). Las observaciones acontecieron en la Unión Soviética, EE.UU., Japón y Canadá.





8. CON LOS CALORIMETROS se mide la cantidad de calor desprendido o absorbido durante una reacción. Esos aparatos se emplearon en el laboratorio del autor para determinar la velocidad de polimerización del formaldehído a temperaturas criogénicas. El instrumento de la izquierda resultó eficaz en un rango comprendido entre 350 y 80 grados Kelvin. Un recipiente de vidrio que contiene monómeros de formaldehído sobresale de la cámara situada en la parte izquierda del calorímetro. Durante los experimentos, la unidad entera se colocó en un recipiente mayor y se enfrió con nitrógeno líquido. El calorímetro de la derecha se empleó a temperaturas que bajaron hasta los 4,2 grados Kelvin. Una región exterior de este instrumento se llenó con nitrógeno líquido y, de helio líquido, una región interior del mismo. Igor M. Barkalov, Anatolii M. Kaplan y Dimitrii P. Kiryukhin desarrollaron los calorímetros. El autor los supervisó.

la raíz cuadrada de la altura de la barrera y a la raíz cuadrada de la masa de la partícula que realiza el efecto túnel. La masa de una especie que reacciona químicamente es comparable con la masa de un fragmento de fisión; la altura de la barrera para una reacción química común es unos 10 millones de veces menor que la de la fisión nuclear; la anchura de la barrera, unas 3000 veces mayor que la de la fisión nuclear. Los efectos de la altura y la anchura, por tanto, se compensan entre sí (la raíz cuadrada de 10 millones es, aproximadamente, 3000), y la probabilidad de que el formaldehído sufra el efecto túnel es parecida a la de la fisión nuclear, inesperadamente suficiente.

La descripción real es mucho más complicada: la posición de una molécula de formaldehído cerca del extremo abierto de una cadena en crecimiento no está fijada de una manera estricta, y el monómero puede oscilar entre sus más inmediatos vecinos. La adición de una nueva molécula a la cadena tendrá la mayor probabilidad de ocurrir en el instante en que la penúltima molécula de la cadena está lo más cerca posible del extremo. En ese momento, la altura y la anchura de la barrera de activación se hallan en sus mínimos valores posibles. En cambio, cuando la penúltima molécula se coloca en una posición lejana del extremo de la cadena, la probabilidad de añadir un nuevo eslabón resulta extremadamente baja. La altura y la anchura de la barrera de activación son, entonces, muy grandes y las frecuencias de transición por encima de la barrera y por efecto túnel son mucho menores.

Los efectos de esas oscilaciones intermoleculares tan lentas se dejaron ver en los experimentos que el autor y sus colegas llevaron a cabo. Estudiaron la reacción del bromuro de hidrógeno y el etileno desencadenada mediante radiación. Encontraron que la sustitución del hidrógeno por deuterio causaba una reducción a un cuarto en la velocidad de reacción a las temperaturas cercanas a la de penetración. Sin embargo, si la reacción tuviera lugar entre moléculas estacionarias, la reducción hubiera sido en un factor del orden de 100.000.

El efecto túnel mitigado por movimientos intermoleculares puede desempeñar un papel notable en el funcionamiento de las proteínas y del ácido nucleico ADN. Las consecuencias podrían apreciarse no sólo a temperaturas criogénicas, sino también a temperaturas por encima de los 200 grados Kelvin, e incluso a temperaturas fisiológicas. En concreto, el efecto túnel puede contribuir significativamente a las transiciones entre los llamados subestados conformacionales de las moléculas biopoliméricas.

Los subestados conformacionales corresponden a ligeras diferencias entre configuraciones moleculares que poseen energías más o menos equivalentes. Un átomo o un grupo de átomos puede, por ejemplo, girarse alrededor de un enlace simple. Las transiciones entre subestados dan cuenta de la movilidad de las moléculas biopoliméricas y pueden estar también relacionadas con su funcionamiento. Hans Frauenfelder y sus colegas, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign y de la de Wayne, junto con David Phillips y sus colegas de Oxford, descubrieron

e investigaron las propiedades de los subestados conformacionales. En su trabajo, ambos grupos se apoyaron en la difracción de rayos X y otras técnicas similares. En colaboración con Rudolf Mössbauer y Fritz Parak, del Politécnico de Munich, el autor y sus colegas investigaron también los subestados.

El estudio de las transiciones entre subestados configuracionales ha llevado a la descripción de un nuevo modelo dinámico para las proteínas y otros biopolímeros. Hace unos 40 años, el eminente físico Erwin Schrödinger postulaba en su libro "¿Qué es la vida?" que una proteína es un cristal aperiódico, irregular. Treinta años más tarde, los investigadores avanzaron la hipótesis de que la proteína era un núcleo cuasi-sólido rodeado por una capa de tipo líquido. De acuerdo con este punto de vista, la capa exterior proporcionaba casi todo el volumen del glóbulo proteínico. Un tercer y más reciente punto de vista sostiene que las proteínas y el ADN son vidrios heterogéneos, y que las transiciones entre sus subestados a temperaturas criogénicas, y quizá también en torno a los 200 grados Kelvin, son en realidad consecuencia del efecto túnel.

Dos últimas consideraciones finales, de interés para otras consecuencias del efecto túnel. Aunque éste interviene de una manera destacada en la formación de enlaces químicos, puede también tomar parte en la destrucción de dichos enlaces y, por tanto, en la de compuestos sólidos. ¿Por qué? Por la penetración por efecto túnel de barreras de activación, que tienden a oponerse al desarrollo de procesos destructivos.

El hecho de que el efecto túnel permita reacciones químicas a temperaturas extremadamente bajas añade una razón más para dudar de la posibilidad de alentar organismos complejos que hayan permanecido congelados durante un largo período. Como mínimo, dichos organismos tendrían que estar apantallados frente a eventuales sucesos, tales como la radiación penetrante, que iniciarían reacciones químicas como las descritas aquí.

Los datos experimentales y las consideraciones teóricas a propósito de las manifestaciones del efecto túnel en las reacciones químicas, junto a las innumerables aplicaciones de la química cuántica en condiciones de frío muy elevado, testifican que la química no ha degenerado en una mera ayuda de la física y la biología. La química es, tal como ha sido siempre, un compañero solvente en el intercambio de ideas nuevas y fundamentales.

Ciencia y sociedad

El tiempo: nacimiento, vida y muerte

Quizás el tiempo (no el meteorológico, claro; curiosa confusión de las lenguas romances) sea el último y más sutil de los conceptos forjados por el cerebro humano. Quizá sea también el único cuya comprensión total sea inalcanzable. El meso y macrocosmos son unos excelentes cronistas de las vicisitudes del tiempo. Dejémosles mostrarnos que el tiempo es extraordinariamente polifacético y en absoluto una estructura estática, homogénea y uniforme, que sólo sirva para ordenar los acontecimientos que tienen lugar en el Universo, como lo era para Newton.

De hecho este tiempo newtoniano es *absoluto*, ya que no depende del espacio, ni del observador, y para él la simultaneidad está bien definida. Además, es el que corresponde a la imagen del tiempo de la gran mayoría de las personas que se hayan entretenido en pensar sobre ello. Y es correcto con extraordinaria precisión para casi todas las experiencias científicas, ya que no para las humanas, para las que "aburrirse" quiere decir que el tiempo "pasa lentamente" y por lo tanto no es uniforme. Sin embargo, pocos físicos sienten pasión por este tiempo. Por suerte, y en sentido estricto, es falso.

La primera crisis viene con la relatividad especial de Albert Einstein (1905). El observador inercial que sincroniza dos relojes y envía uno de viaje, observa, cuando vuelven a estar juntos los relojes, que el que ha permanecido con él ha adelantado con respecto al otro. Para la relatividad especial el movimiento afecta al tiempo, el cual forma una entidad única con el espacio, y la simultaneidad es relativa, ya que depende del observador. El tiempo se ha *relativizado*.

La segunda crisis viene con la relatividad general de Einstein (1915). Para la relatividad especial el espacio-tiempo es una estructura dada, aunque ofrezca perspectivas diferentes, parecido a como una casa, que siempre es la misma, puede ser observada desde diferentes puntos de vista. No es así en la relatividad general, para la que el espacio-tiempo es una estructura dinámica determinada por su contenido energético local, igual que los castillos inflables que se encuentran en algunos parques de atracciones se deforman al subir un niño y lo hacen más acusadamente cuanto mayor sea el peso del niño. La curvatura producida en el espacio-tiempo por la energía implica un cambio en el tiempo. Este hace que el observador que sincroniza dos relojes, envía uno a una zona de campos gravitatorios menos intensos (cima de una montaña) donde la curvatura es por lo tanto menor, y los compara de nuevo cuando vuelven a estar juntos, ve que el suyo ha retrasado con respecto al reloj viajero (montañero). Al revés ocurre si el campo gravitatorio es más intenso. Tras la relativización del tiempo tenemos, pues, la *geometrización*. Que ambas son absolutamente reales queda perfectamente ejemplarizado por los viajes realizados por relojes atómicos en vuelos comerciales dando la vuelta a la Tierra (1971). El reloj que viajó hacia el este retraso 59 ± 10 nanosegundos con respecto al que quedó en tierra, y el que viajó el oeste adelantó 273 ± 7 nanosegundos. Las teorías de la relatividad predicen 40 ± 23 nanosegundos de retraso y 275 ± 21 nanosegundos de adelanto respectivamente. Si ganamos una "vuelta al mundo" en un sorteo, hagámosla siempre hacia el este: al volver seremos *realmente* más jóvenes, tan realmente como puede ser real la muerte.

La tercera crisis es consecuencia de la anterior, cuando ésta se lleva a una situación límite. Dada una distribución de energía con simetría esférica se le asocia una distancia llamada radio de Schwarzschild, que crece con la energía. Si las densidades energéticas son muy elevadas, toda la energía puede estar en el interior del radio de Schwarzschild: se habla entonces de un agujero negro. Imaginemos dos amigos con sus respectivos relojes sincronizados acercándose al radio de Schwarzschild de un agujero negro. Deciden separarse quedándose uno fuera del agujero negro mientras que el otro cae en él atravesando el radio de Schwarzschild. El que cae, y según su reloj, necesita un tiempo finito para llegar al radio de Schwarzschild: su reloj marca t_s en ese instante. En tiempos posteriores ya está en el interior del agujero negro. No ha observado nada especial en el instante t_s. El otro, que queda fuera del agujero negro, observa, según su reloj, que el que cae necesita un tiempo infinito en llegar al radio de Schwarzschild: para él, el tiempo del que cae se congela y los tiempos posteriores no existen. El tiempo del que cae posterior a t_s no existe según el otro observador: efectivamente, no hay posibilidad de enviar señales fuera de un agujero negro y así las lecturas del reloj que cae posteriores a t_s son inasequibles para el observador exterior. La radiación cuántica de los agujeros negros de Stephen Hawking (1974) tampoco altera esta situación. Tras la geometrización tenemos la *congelación* del tiempo.

La cuarta crisis que sobreviene al tiempo se hace patente a una distancia increíblemente pequeña del centro del agujero negro: 10^{-33} cm. A esta distancia, llamada de Planck y veinte órdenes de magnitud más pequeña que los radios nucleares, el tiempo empieza a cuantificarse y, dejando de ser continuo, se discretiza. La mecánica cuántica está afectando al propio tiempo que fluctúa formando cuantos de tiempo. No entendemos bien lo que significan estas partículas de tiempo o pretiempo y esta cuarta crisis puede acompañarnos aún durante mucho tiempo, y quizás incluso eternamente. Todos los conceptos a los que estamos acostumbrados dejan de tener sentido: las leyes de la naturaleza, la causalidad, el determinismo. Lo que pasa en el centro del agujero negro es lo mismo, invertido en el tiempo (implosión en vez de explosión), que lo que pasó en el big bang. El tiempo se *cuantiza*.

Pero, ¿tenemos una eternidad para entender el pretiempo? No, y para verlo enviemos relojes hacia el futuro. Consideremos primero el caso de un universo abierto, o sea, en expansión sin fin. Sabemos que la explosicón genera desequilibrio, pero finalmente un universo abierto tiende al equilibrio termodinámico. En una situación de equilibrio con densidades de energía que tienden hacia cero, nada ocurre. En particular los relojes dejan de funcionar y no hay posibilidad de construir nuevos. Pero aunque existiesen perderían todo sentido ya que nada acontece. El tiempo pierde sentido. El tiempo *muere* térmicamente.

¿Y si el universo es cerrado? Tras la fase expansiva viene la fase de contracción. La temperatura aumenta y lo mismo ocurre a la densidad de energía. La contracción es cada vez más rápida. Pronto es como un colapso, de hecho como un agujero negro en el que no se puede escoger entre caer o no caer en él. Finalmente el tiempo se discretiza

de nuevo y deja de tener sentido. El final del tiempo es como su principio: el tiempo se desmenuza. Pero según Hawking (1985) algo muy curioso pasa entre entre un pretiempo y el siguiente, más concretamente entre la fase expansiva y la de contracción. En esta última el orden *crece* con el tiempo, por lo que la entropía decrece: la flecha termodinámica del tiempo se invierte. El contenido de nuestra memoria disminuye con el tiempo y los efectos preceden a las causas. Recordaremos el futuro y olvidaremos lo recordado cuando haya pasado. Sin embargo, muy posiblemente no sea tan extraordinario lo que se observe, porque la flecha psicológica del tiempo viene determinada por la termodinámica. Si ésta se invierte lo mismo le pasa a la psicológica y todo ocurre tal como lo conocemos de nuestra experiencia actual. Lo extraordinario sólo pasaría para un observador en fase expansiva que viese cómo ocurren los acontecimientos en la fase contractiva: ocurrirían en un orden antinatural. Pero esta observación no es posible. Y si la flecha del tiempo se invirtiese en el momento de máxima expansión, ¿qué diferencia habría entre el *big crunch*, la gran implosión final, y el *big bang*, la gran explosión inicial? Ninguna. Para nuestro cerebro el universo siempre estaría en expansión y el futuro sería una imagen especular del pasado. El tiempo no acabaría, sino que se repetiría: sería *cíclico*. Como la pescadilla que se muerde la cola. Como una historia interminable. (Rolf Tarrach.)

Textos caducos

Hace más de una década que se denunció el fraude cometido por Sir Cyril Burt, pese a lo cual, su legado científico se conserva vivo en las obras de texto. Burt, eminente psicólogo británico que murió en 1971, a la edad de 88 años, consagró gran parte de su carrera a demostrar la influencia de los genes sobre la inteligencia humana. A finales de la década de 1970 se descubrió que algunos de sus datos eran pura invención, que había falseado la fuente de otras informaciones y que no existían dos de sus supuestos coautores. A partir de entonces se rechazaron los estudios de Burt por poco fiables. Diane B. Paul, de la Universidad de Massachusetts en Boston, sostiene que, no obstante ello, los libros de genética siguen recogiendo la obra de Burt, a menudo sin atribuírsela.

Concluye Paul que la cita anónima de los resultados de Burt y de otros estudios desacretidatos o caducos son muestra de la poca erudición con que en general se aborda la cuestión de la genética de la inteligencia humana en los libros de genética del primer ciclo universitario. Algunos aspectos de esa materia se tratan en ellos sin que estén justificados por los hallazgos empíricos de que se dispone. La tesis de Paul, publicada en un número reciente de *The Quarterly Review of Biology*, se basa en el examen de 28 de los 31 libros de introducción a la genética general o humana publicados en los Estados Unidos entre enero de 1978 y marzo de 1984.

En 19 de los 28 textos se le da un trato importante a la heredabilidad de la inteligencia humana. La mayoría de los 19 sostienen que es alta la heredabilidad del coeficiente de inteligencia (C.I.) y muchos aportan estimaciones numéricas del grado de heredabilidad. Sin embargo, Paul ha comprobado que los estudios que con mayor frecuencia se citan a la hora de apoyar la hipótesis de que la inteligencia humana es muy heredable son fraudulentos, o poco fiables por defectos metodológicos. Entre ellos se cuenta un análisis de Burt de gemelos criados por separado. El trabajo, realizado a lo largo de muchos años, perdió todo crédito a finales de la década de 1970, al descubrirse que las conclusiones de Burt se apoyaban en datos falsos.

Con todo y con ello, en 10 de los 19 libros se presentaban esos análisis como prueba del alto grado de heradabilidad. En general no se le atribuían de forma explícita los resultados. Se presentaban en una ilustración, resumiendo los hallazgos de 52 estudios del C.I. y el parentesco genético. La ilustración procede de un trabajo publicado en *Science* en 1963, obra de L. Erlenmeyer-Kimling y Lissy F. Jarvik, de la Facultad de Medicina y Cirugía de la Universidad de Columbia. Además de contener los datos falsos de Burt, el trabajo presenta abundantes defectos metodológicos y, según Paul, los especialistas en la materia lo juzgan caduco. Pese a ello, comprobó que se trataba de la prueba que con mayor frecuencia se esgrimía en favor de un alto grado de heredabilidad de la inteligencia. De hecho, en algunos textos constituía la única prueba presentada.

Sugiere la autora que los libros de texto propagan hipótesis sin validar porque quienes los escriben copian de otros. Quienes redactan obras de carácter introductorio rara vez vez dominan todos los campos que en ellos se abordan. De ahí que los autores suelan basarse en material de otros textos, copiando a veces pasajes enteros punto por punto. Consecuencia de ello es que persisten en esas obras hallazgos rechazados mucho antes por los investigadores especializados.

La noción de que los genes influyen poderosamente en el rendimiento intelectual pudiera también casar con el sesgo de los propios autores. "Cualesquiera que sean las causas que han llevado a la situación actual, escribe Paul, la consecuencia es diáfana. Se explica a la mayoría de los alumnos de genética que la inteligencia presenta un alto grado de heredabilidad... atendiendo a pruebas derivadas de estudios que encajan en la historia de la ciencia, o la pseudociencia, mejor que en libros de textos contemporáneos."

Regeneración neuronal

Los trabajos presentados recientemente ante la Sociedad de Neurología de los Estados Unidos apuntan la posibilidad de inducir la fusión de los extremos de un nervio lesionado y de que éste recupere su función. En los experimentos realizados por dos grupos se insertaban en un tubo de silicona relleno de una matriz de polímeros los extremos de nervios lesionados del sistema nervioso periférico. Según parece, la matriz facilita el crecimiento neuronal: las fibras llegaron a reunirse superando una distancia de 15 milímetros, separación más que considerable en los casos de lesiones nerviosas.

Uno de los grupos lo encabeza Ioannis Yannas, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. En su caso, el tubo de silicona se rodeaba de colágeno y un polisacárido; se entrecruzaban los materiales de modo que formasen una red porosa. Otro equipo, dirigido por Richard Sidman, de la Facultad de Medicina de Harvard, utilizaba tanto una matriz de colágeno como un gel que contenía laminina, una glucocoproteína.

En la actualidad, los nervios periféricos que resultan de vital importancia para el funcionamiento del organismo se reparan injertando quirúrgicamente una porción de otro nervio del cuerpo. La práctica no carece de limitaciones. La zona de donde se extrae el nervio pierde sensibilidad. Por otra parte, no se puede extirpar más que una porción limitada de tejido nervioso para esa aplicación.

¿Por qué funciona la técnica del tubo? "Cuando no se empleaba el polímero, explicó Jerry Silver, de la Facultad de Medicina de la Universidad Case Western Reserve e integrado en el grupo de Yannas, no se registró crecimiento neuronal, o en todo caso sólo se desarrollaba tejido conectivo." En

presencia del polímero se regeneraron los vasos sanguíneos y el crecimiento resultó espectacular. Por otra parte, al microscopio electrónico se observó gran número de células de Schwann, elementos no neuronales que aportan apoyo estructural y aíslan las terminaciones nerviosas. "Aparentemente, señaló Silver, los tubos rellenos de polímero permiten a las células de Schwann salvar distancias mucho mayores que en el tubo vacío. Suponemos que la superficie del polímero promueve la migración celular." El paso siguiente, según Silver, consistirá en mejorar la eficacia del polímero sembrándolo con células de Schwann antes de implantar el tubo.

Yannas, Sidman y sus colaboradores trabajaron con tejidos procedentes del sistema nervioso periférico (la porción que no forma parte del encéfalo ni de la médula espinal). Albert Aguayo, de la Universidad McGill, y sus colegas han comprobado que los axones del sistema nervioso central se regeneran en presencia de tejido nervioso periférico transplantado.

Autodefensa

A finales del año pasado investigadores del Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos (NCI) anunciaron que el tratamiento con un mensajero químico que desempeña un importante papel en el sistema inmunitario redujo, cuando menos a la mitad, los tumores de 11 pacientes afectos de un cáncer avanzado, sobre un total de 25. La terapia empleada constituye una de las diversas estrategias, denominadas a veces modificadores de la respuesta biológica, que se apartan de las técnicas habituales, a saber, cirugía, radiación y quimioterapia.

Los modificadores de la respuesta biológica se sirven de elementos del sistema inmunitario natural para proceder al ataque de las células tumorales, dejando intactas, así se espera, las células sanas. Se ha desarrollado ese nuevo enfoque gracias a los avances registrados en la comprensión de las relaciones que se establecen entre diversos componentes del sistema inmunitario: linfocitos (glóbulos blancos, algunos de los cuales proceden a atacar directamente las células enfermas); anticuerpos (moléculas que se unen a células específicas y provocan su destrucción); macrófagos (carroñeros que digieren partículas foráneas) y linfocinas (moléculas secretadas por los linfocitos que estimulan la actividad de las células de ataque). Técnicas de reciente desarrollo han facilitado el aislamiento, clonación y estudio sistemático de esos y otros elementos.

Steven A. Rosenberg y sus colegas presentaron en el NCI los resultados del pasado diciembre. Extrajeron linfocitos de la sangre de los pacientes y los estimularon con interleucina-2 (IL-2), una linfocina. Se retornaron a los pacientes esas nuevas células, denominadas ahora células asesinas activadas con linfocinas (LAK), junto con más IL-2 para reforzar su actividad de destrucción tumoral.

Los primeros resultados alentaron a los oncólogos. Se logró la remisión total de un melanoma (cáncer de piel de carácter virulento) y la regresión de la malignidad en 10 pacientes afectos de cáncer de piel, colon, riñón y pulmón. Pero numerosos especialistas, Rosenberg entre ellos, insisten en que los datos son pocos aún para afirmar si el tratamiento resulta práctico y seguro. Entre los obstáculos que se oponen a la extensión de la nueva terapia se citan su coste (superior al millón de pesetas por persona), su complejidad y los efectos colaterales. En dos pacientes los efectos más graves les acarrearon problemas respiratorios por retención de fluidos. Señala también Rosenberg que en el último grupo murió una persona poco después del tratamiento.

Se llevan a cabo también ensayos clínicos para explorar el potencial terapéutico de los interferones, que estimulan a los macrófagos y los linfocitos que se oponen a los tumores. La forma de interferón conocida por alfa llegó a considerarse "el ungüento mágico" de la lucha contra el cáncer. Jordan U. Gutterman, del Hospital e Instituto Tumoral M. D. Anderson de Houston, ha comprobado que se comporta con diversos grados de eficacia contra algunas neoplasias poco comunes, en especial la leucemia de las células pilosas, pero que no resulta indicado en el caso de cánceres de pulmón, colon, próstata y páncreas.

Se ha demostrado que los interferones resultan más eficaces si se administran conjuntamente con el factor de necrosis tumoral (TNF). Descubierto por Lloyd J. Old, del Centro de Oncología Memorial Sloan-Kettering, el TNF quizá comparta parte del éxito de los resultados de Rosenberg, por cuanto las células del sistema periférico sometidas a tratamiento con IL-2 elaboran TNF.

Otra línea de investigación se centra en los anticuerpos monoclonales, que se construyen de tal forma que resulten específicos frente a los antígenos que se desee. En teoría, un anticuerpo monoclonal puede acarrear de forma selectiva una toxina, un fármaco o un isótopo radiactivo hasta las células tumorales, sin dañar a las células normales. Se somete también a estudio la administración de anticuerpos monoclonales sin substancias "foráneas". Hilary Koprowski, del Instituto Wistar de Anatomía y Biología, afirma que los monoclonales han activado macrófagos extraídos de pacientes; inoculados de nuevo, los macrófagos se dirigieron a los lugares cancerosos y redujeron los tumores de alrededor de la mitad de 300 pacientes afectos de cánceres metastizados, entre otros, cáncer de páncreas, de estómago y de intestino grueso. También se ha sometido a ensayo la actuación de anticuerpos monoclonales aislados como armamento anticanceroso en pequeñas series de pruebas clínicas contra linfomas, leucemias y melanomas, alcanzándose resultados dispares. Los anticuerpos no matan directamente las células; antes bien, parecen activar diversos componentes del sistema inmunitario, como los linfocitos que se hallen en las cercanías, macrófagos y el complemento (una cascada de proteínas que destruye las células unidas a anticuerpos).

Entre otras posibles inmunoterapias se cuenta la BCG, vacuna antituberculosa que, según se ha demostrado, ejerce cierto efecto sobre los melanomas y la recurrencia de cáncer de vejiga; la interleucina-1, que estimula la producción de IL-2 por parte de los linfocitos y el factor estimulante de la formación de colonias, que activa los macrófagos y otras células derivadas de la médula ósea. Se ha logrado la clonación de los genes que codifican los dos últimos citados, lo que permitirá la realización de ensayos clínicos. Old mantiene las esperanzas en un postrer enfoque: una vacuna que impida la recurrencia del cáncer tras la extirpación del tumor principal.

Sigue sin resolverse la cuestión de si las terapias inmunológicas sustituirán algún día a las que hoy se aplica, pero muchos investigadores no dudan de que esos nuevos enfoques cuando menos aumentarán la eficacia de los tratamientos comunes, llevando a término en algunos casos la desaparición total de tumores reducidos por medios quirúrgicos, por radiación o por quimioterapia. En última instancia, parece que se alcanzará una eficacia máxima por la combinación de inmunoterapias. Como señala Gutterman, los elementos del sistema inmunitario suelen actuar de manera coordinada, y esa misma sinergia se advierte ahora entre los agentes biológicos con los que se experimenta.

Imágenes sísmicas de los límites de placa

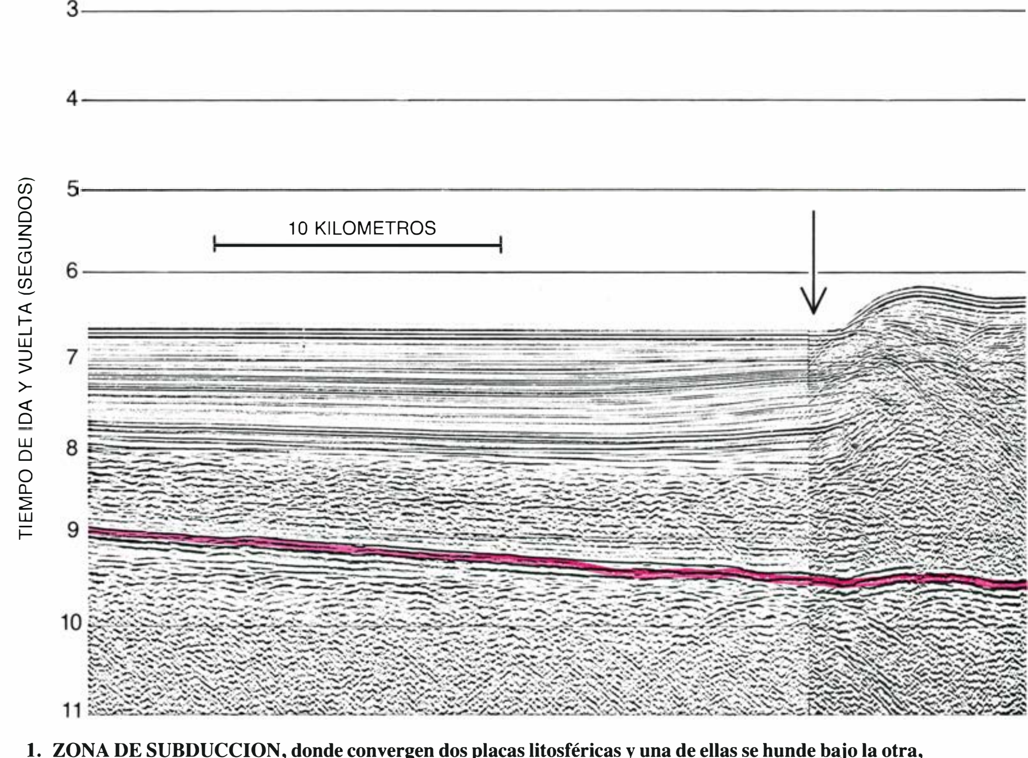
Gracias a la reflexión de las ondas sonoras provocada por explosiones submarinas se obtienen imágenes de la estructura de la corteza oceánica en zonas de subducción y valles de fractura

John C. Mutter

¿Cómo averiguan los geólogos lo que hay y los procesos que se están desarrollando bajo el suelo oceánico? En las dos últimas décadas el triunfo de la teoría de la tectónica de placas ha conferido especial significado a esa cuestión. Las placas móviles que constituyen la capa externa de la tierra presentan, pese a su diversidad de tamaño, desde unos pocos centenares hasta decenas de miles de kilómetros cuadrados, una importante característica común: su interior es rígido. Por consiguiente, sólo experimentan grandes deformaciones en sus límites, y en ellos se dan los procesos geológicos de gran escala. Las montañas y volcanes se forman donde las placas colisionan; allí donde se separan, se abren cuencas oceánicas y se crea nuevo suelo marino. Sacuden los terremotos esas dos regiones, aunque también las fallas transformantes, donde se producen rozamientos violentos de unas placas contra otras. Para interpretar los mecanismos de tales interacciones los investigadores han de estudiar la deformación de la corteza en los bordes de placa; puesto que un 70 por ciento de la superficie de la tierra está cubierta por los océanos, la mayoría de esos bordes se encuentran sumergidos a grandes profundidades.

A diferencia de los geólogos que trabajan en tierra, los geólogos marinos y geofísicos no pueden efectuar una observación inmediata de su materia de estudio. Qué duda cabe de que se han obtenido imágenes espectaculares del suelo marino desde vehículos sumergibles de investigación y con buques de superficie que arrastran cámaras con cables de varios kilómetros de longitud, pero la fracción de fondo oceánico sometida a observación visual resulta insignificante, y no parece que la situación vaya a cambiar en un futuro inmediato. La perforación en mares profundos ha proporcionado datos esenciales acerca de las formaciones rocosas situadas bajo el suelo del mar, pero también se limita a puntos aislados. Además, las perforaciones profundas no han penetrado ni siquiera dos kilómetros de las capas superiores, sedimentarias, de la corteza oceánica y apenas uno de las capas ígneas del zócalo, formadas por el magma que asciende en los centros de expansión mesoceánicos.

Ello no obstante, puede afirmarse que se conoce la estructura de la corteza oceánica, cuando menos a grandes rasgos, de la mayoría de las regiones



1. ZONA DE SUBDUCCION, donde convergen dos placas litosféricas y una de ellas se hunde bajo la otra, penetrando en la astenosfera; se reconocen fácilmente en las imágenes obtenidas por reflexión sísmica multicanal. La mayor parte de la corteza de la placa descendente se ve arrastrada hasta el interior de la astenosfera. Sin embargo, en muchas zonas de subducción la porción más externa de las capas de sedimentos no consolidados se separa de la corteza descendente por fricción con la capa cabalgante. El apilamiento superior de sedimentos forma el denominado prisma de acreción. Ejemplo de ello es la prominencia de Curaçao, frente a Venezuela (*arriba*), en la que se encuentran las Antillas Holandesas. En esa zona, la placa del Caribe se hunde bajo la Sudamericana. En la imagen por multicanal el límite entre los sedimentos no consolidados de la cuenca de Venezuela y los sedimentos consolidados subyacentes aparece como una capa de reflexión acústica intensa (*color*). Denominada A″, se mantiene en gran parte intacta durante casi 50 kilómetros más allá de la base de la promiencia de Curaçao (*flecha*); indica ello que las rocas sedimentarias situadas por debajo se subducen, a diferencia de lo que ocurre con las capas de sedimentos dúctiles situadas sobre la capa reflectora, que se deforman en masas caóticas: se separan por fricción de la capa inferior consolidada y se apilan, constituyendo la prominencia. En las imágenes sísmicas, la posición de la capa reflectora viene representada por el tiempo que tarda una señal de sonido en ir y volver desde el nivel del mar hasta la capa reflectora. La profundidad del reflector depende de la velocidad del sonido en las rocas suprayacentes.

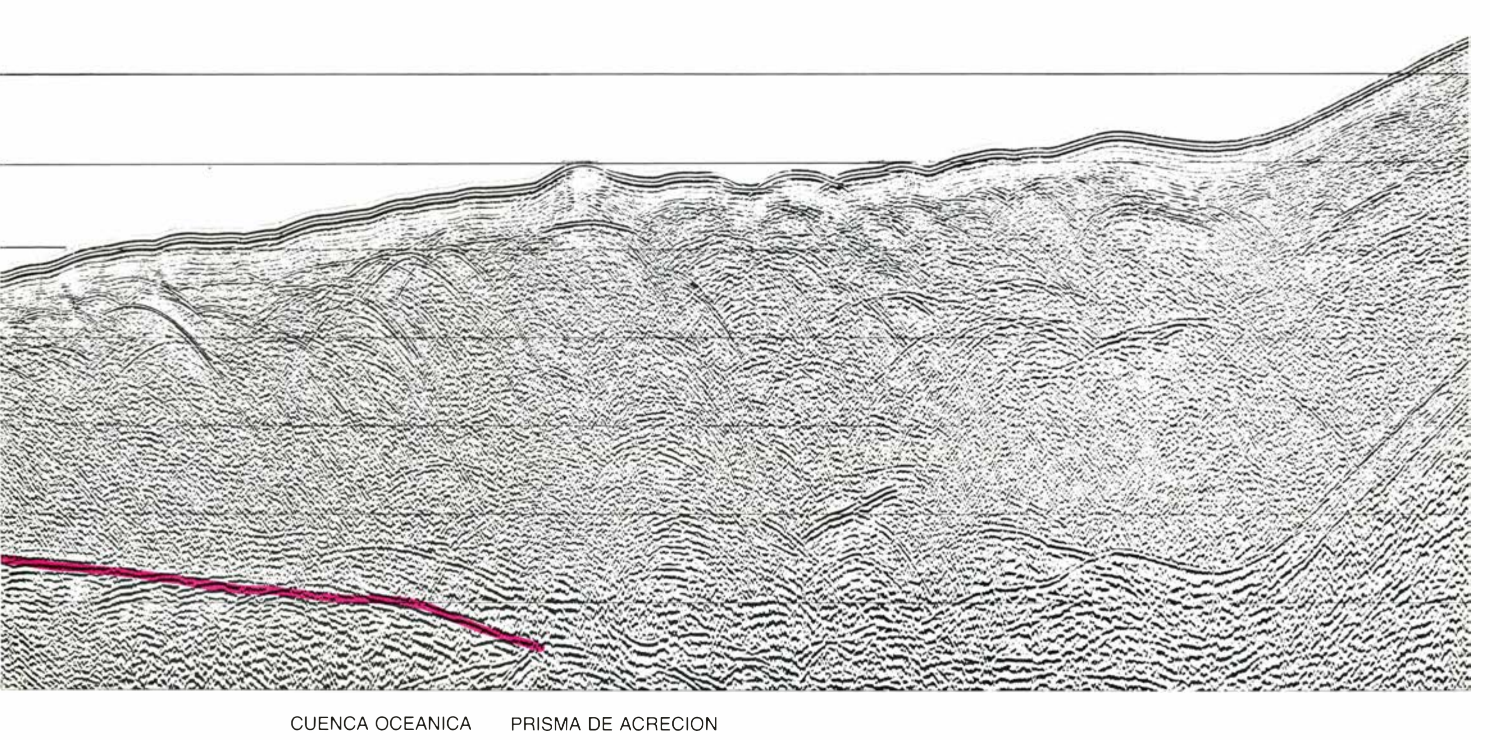
del mundo. Se sabe ya que, por término medio, las capas ígneas tienen entre cinco y siete kilómetros de espesor. Dato que se ha inferido de la respuesta de la corteza al sonido. Las ondas sonoras generadas por explosivos o cañones de aire comprimido activados desde un buque de superficie atraviesan la piel de la corteza. Parte de esas ondas se refleja en los límites entre capas sucesivas de rocas, debido a que las capas de diferente composición y densidad transmiten la energía acústica (sísmica) a velocidades distintas. Las ondas reflejadas retornan a la superficie, donde se detectan mediante hidrófonos remolcados por el buque. Tras el análisis de las reflexiones se dibuja un perfil (en realidad una imagen acústica) de los estratos rocosos.

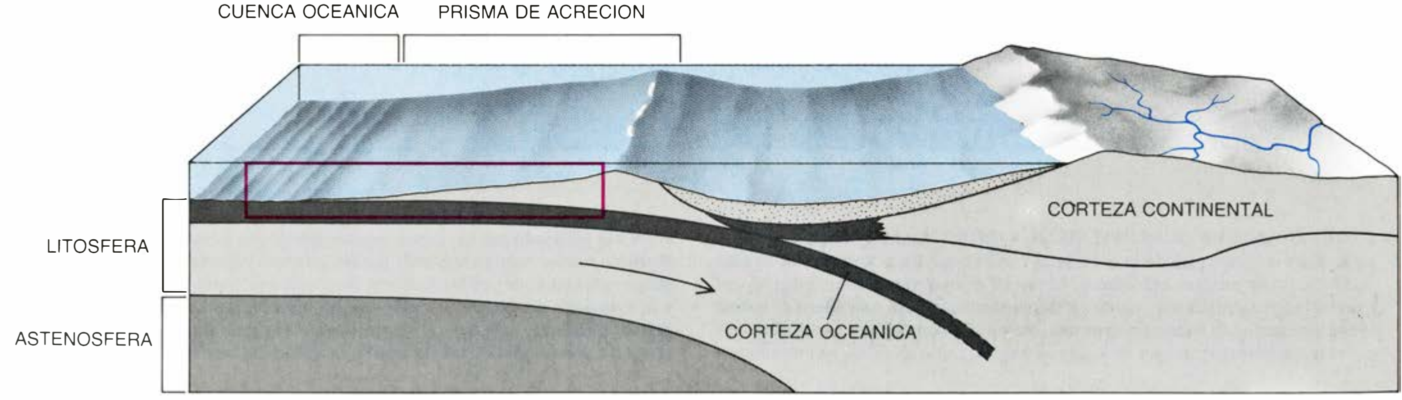
Vienen realizándose perfiles de reflexión desde la década de 1950. Sin embargo, a partir de finales de los años 70 su complejidad ha registrado un notable crecimiento. El principio fundamental que subyace a esos recientes avances es sencillo: anotando múltiples reflexiones procedentes de un punto de fondo oceánico, pueden combinarse los diversos perfiles en uno solo. Cuanto mayor sea el número de reflexiones considerado, mayor será la resolución de la imagen de ese punto de la corteza. Los buques de investigación sísmica, como el que emplean en la mayoría de sus investigaciones el autor y sus colegas, del Observatorio Geológico Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, despliegan miles de hidrófonos. El equipo les permite registrar, en poco tiempo, gran número de reflexiones procedentes de muchos puntos del suelo marino.

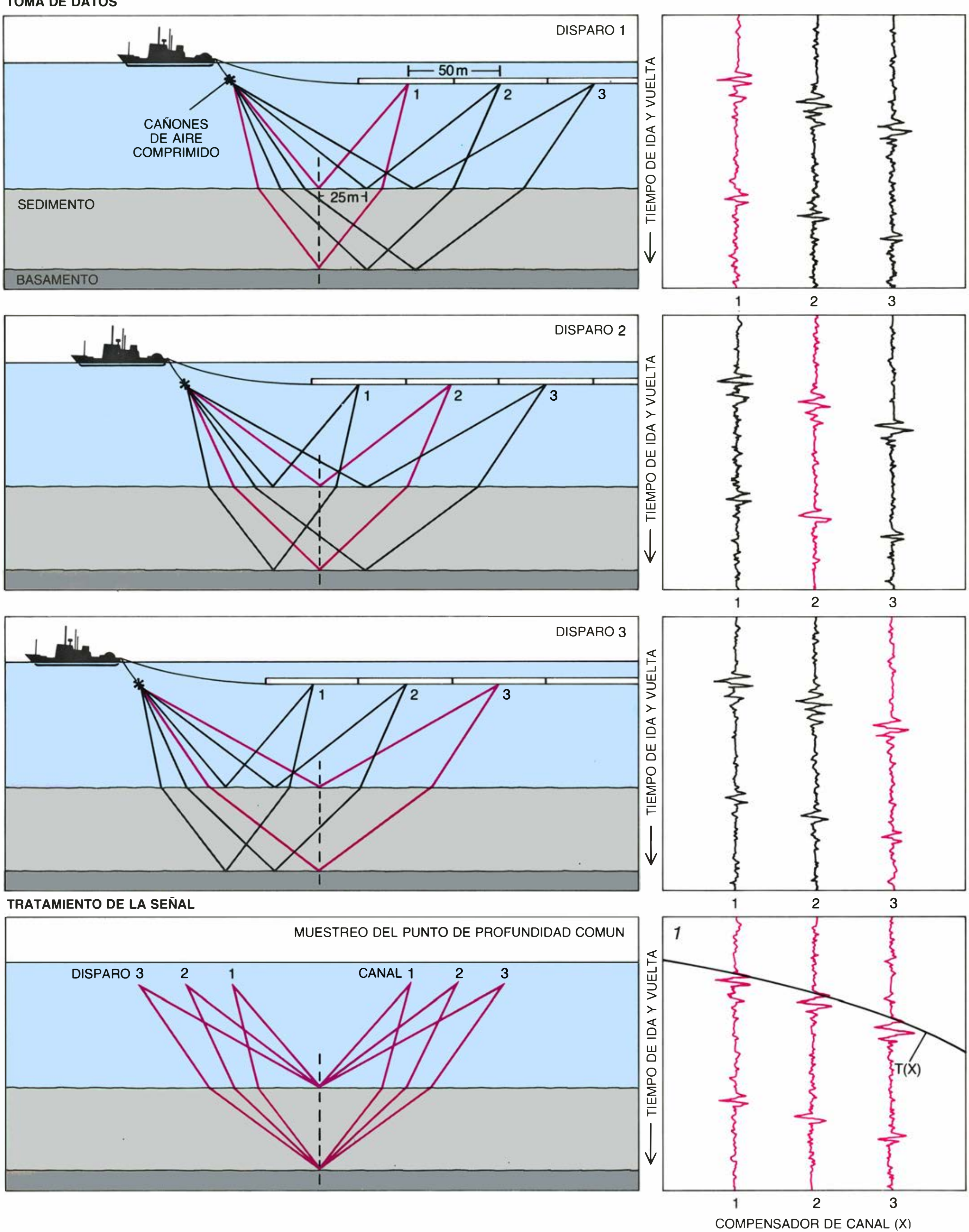
Esta técnica, llamada perfil sísmico de reflexión multicanal (o de recepción múltiple), ha demostrado su valor en un amplio abanico de aplicaciones. Se desarrolló en principio para la industria de exploración petrolífera; puesto que la velocidad de las ondas sísmicas es muy inferior en el petróleo o en el gas que en la roca, los depósitos del subsuelo marino suelen producir fuertes reflexiones en los perfiles de la corteza. He centrado mi trabajo en la aplicación del perfil de reflexión sísmica multicanal al estudio de la tectónica de placas. Las imágenes estructurales de los límites de placas han confirmado algunas de las predicciones fundamentales de la teoría y han permitido un mayor refinamiento en la interpretación de las interacciones entre placas. Como suele ocurrir, además, han suscitado cuestiones de parejo interés.

Toma de datos sísmicos

La obtención de perfiles de reflexión se apoya en una vieja técnica de la topografía del fondo marino: la ecosonda. Conocida la velocidad del sonido en el agua (alrededor de 1500 metros por segundo), se calcula la profundidad del océano en cualquier punto en virtud del tiempo que tarda una onda sonora en alcanzar el suelo marino y volver a la superficie. Aunque el suelo marino refleja la mayor parte de la energía acústica que incide en él, en las ondas de baja frecuencia se refracta







2. OBTENCION DE UN PERFIL SISMICOMULTICANAL. Segeneranimágenes muy contrastadas de la corteza al combinarse las reflexiones de sonido registradas por muchos hidrófonos. El buque de investigación arrastra los cañones de aire comprimido y un largo "serpentín" que lleva una hilera de hidrófonos agrupados en canales receptores. Después de un disparo, cada canal registra el sonido reflejado por el suelo marino, así como el sonido refractado por el suelo y reflejado por las capas rocosas inferiores. (Tanto el sedimento como el zócalo rocoso pueden contener límites internos reflectantes.) Cada canal registra reflexiones de puntos distintos. Se coordinan los intervalos entre disparos y la velocidad del buque de modo que el punto que muestrea un canal en un primer disparo lo muestree el siguiente en el segundo disparo; entre disparos, el buque avanza una distancia igual a la mitad del intervalo entre canales. El

una fracción significativa de la energía acústica. Las ondas refractadas penetran en las formaciones rocosas subyacentes, lo cual permite efectuar sondeos más profundos y obtener perfiles sísmicos de la corteza. Un perfil sísmico que alcance hasta la base misma de la corteza oceánica, la discontinuidad de Mohorovičić (que suele hallarse por lo menos a 10 kilómetros por debajo del nivel del mar), exige el empleo de una potente fuente de sonido de baja frecuencia. El sonido debe ser muy breve; si se prolonga y arrastra, las reflexiones emitidas por capas rocosas próximas se solapan y el perfil sale borroso.

Las fuentes de sonido de uso común son los cañones de aire comprimido, que emiten ondas de sonido en la gama de frecuencias que va de los seis a los 60 hertz (ciclos por segundo). Se prefiere desplegar una formación de cañones pequeños más que uno solo de gran tamaño porque los pequeños producen sonidos más definidos. A intervalos regulares, por regla general cada 20 segundos, se produce el disparo simultáneo de la batería. La potencia total de la serie puede alcanzar valores considerables. Los barcos de exploración petrolífera comercial arrastran 30 o más cañones, cada uno de los cuales descarga una presión de aire de hasta 280 kilogramos por centímetro cuadrado. Desde semejante batería, el sonido penetra a veces hasta 15 kilómetros en el interior de la tierra.

Las reflexiones que llegan de la corteza se detectan por medio de un "serpentín": un largo tubo de plástico lleno de un líquido de baja densidad y dotado de una hilera de hidrófonos. El líquido proporciona flotabilidad al serpentín; junto con el plástico, reduce el contraste de la velocidad del sonido entre los hidrófonos y el agua del mar, aminorándose con ello la proporción de ondas que escapan a los hidrófonos y quedan sin registrar. Se remolca el serpentín hasta una distancia prefijada detrás de los cañones de aire comprimido, lastrado de tal modo que las boyas se sitúen a una profundidad aproximada de 10 metros, para aislar los detectores del estruendo de las olas de superficie.

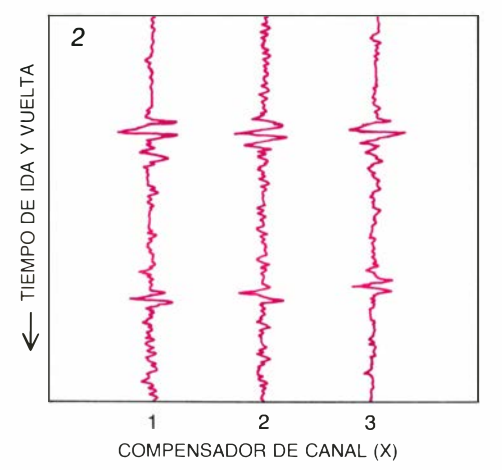
Se fabrican serpentines de muy diversos tamaños. El del Lamont-Doherty mide 2,4 kilómetros de longitud y tiene 2400 hidrófonos, separados entre sí por intervalos de un metro. Se divide el total en 48 canales receptores, espaciados 50 metros, constituidos cada uno de ellos por 50 hidrófonos enlazados eléctricamente. Cada canal convierte la señal acústica que recibe en una señal eléctrica que se amplificará, digitalizará y almacenará en cinta magnética. Así, por cada disparo de los cañones se registran 48 señales de retorno distintas. Cada señal habrá seguido una trayectoria propia entre la fuente y el receptor y se habrá reflejado en un punto distinto del suelo marino; la trayectoria más larga será la que recoja el último canal del serpentín.

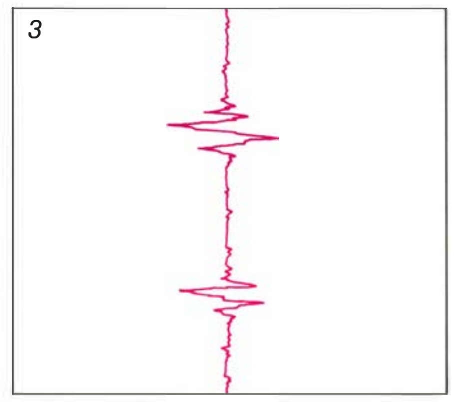
El registro, o traza, recogido por un solo canal después de un disparo constituye ya un perfil de profundidad de la corteza en el punto de reflexión. Los picos de las trazas señalan el tiempo de llegada y la intensidad de las reflexiones en los límites de los estratos rocosos. Sin embargo, una sola traza no informa más que de las capas poco profundas de la corteza. Al alcanzar la superficie, las reflexiones de las capas profundas llegan muy débiles, pues la señal se refleja en los límites suprayacentes y se atenúa a su paso por muchos kilómetros de roca. Por otra parte, se enmascara también la señal con el ruido de fondo: el bramar de las olas, el zumbido de los motores del buque y el chapoteo del agua al paso de los hidrófonos. En un registro sísmico, el ruido ahoga la señal.

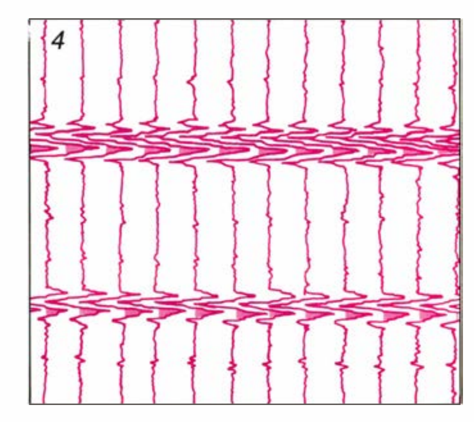
Tratamiento de la señal

Afortunadamente, el ruido es estocástico; no así la señal. Al sumar un gran número de perfiles trazados sobre un solo punto reflector, los picos de ruido quedarán a menudo fuera de fase y se cancelarán mutuamente. Las señales, en cambio, estarán en fase y se sumarán. Se explota esa circunstancia en la elaboración de perfiles por reflexión multicanal para obtener una imagen compuesta que amplifica la señal y suprime el ruido, lográndose una mejor resolución de las capas reflectantes.

Si se dispone de un serpentín multicanal no resulta difícil obtener muchas señales a partir de puntos de reflexión aproximadamante equivalentes: se ajustan el intervalo entre disparos de cañón y la velocidad del buque para que todos los canales capten sucesivamente las reflexiones del mismo punto. Dado que el ángulo de reflexión de la onda de sonido es igual al ángulo de incidencia en el límite que provoca la reflexión, el espaciamiento ideal entre los puntos reflectores es la mitad de la distancia entre canales. Si el buque avanza, respecto del suelo oceánico, esa misma distancia entre dos disparos consecutivos, el punto de reflexión que muestree un canal en el primer disparo lo muestreará el siguiente canal en el segundo disparo.







primer paso del tratamiento de la señal recibida consiste en reunir los registros de las reflexiones correspondientes a un punto de profundidad común (*1*). Seguidamente, un ordenador identifica los picos correspondientes a las reflexiones que proceden de un mismo límite; esas reflexiones habrán atravesado las mismas capas de roca, y sus tiempos de llegada a los distintos canales están relacionados por una fórmula aproximada que considera la velocidad de las ondas sísmicas en esas capas. Se desplazan las trazas de modo que los picos correspondientes presenten el mismo tiempo de llegada (*2*). Al sumar las trazas, los picos de reflexión se amplifican, mientras que el ruido, estocástico, tiende a cancelarse (*3*). Se obtiene así un perfil contrastado de la corteza en un punto. Para obtener una imagen continua de una extensa sección de la corteza se colocan uno a continuación del otro miles de perfiles de un punto y se nublan los picos (*4*).

Acabada la expedición, y atracado el buque, un ordenador analiza los datos recolectados. Se empieza por extraer de los registros de cada disparo las trazas correspondientes a un punto determinado del fondo oceánico. El grupo de trazas resultante se denomina muestra de punto de profundidad común.

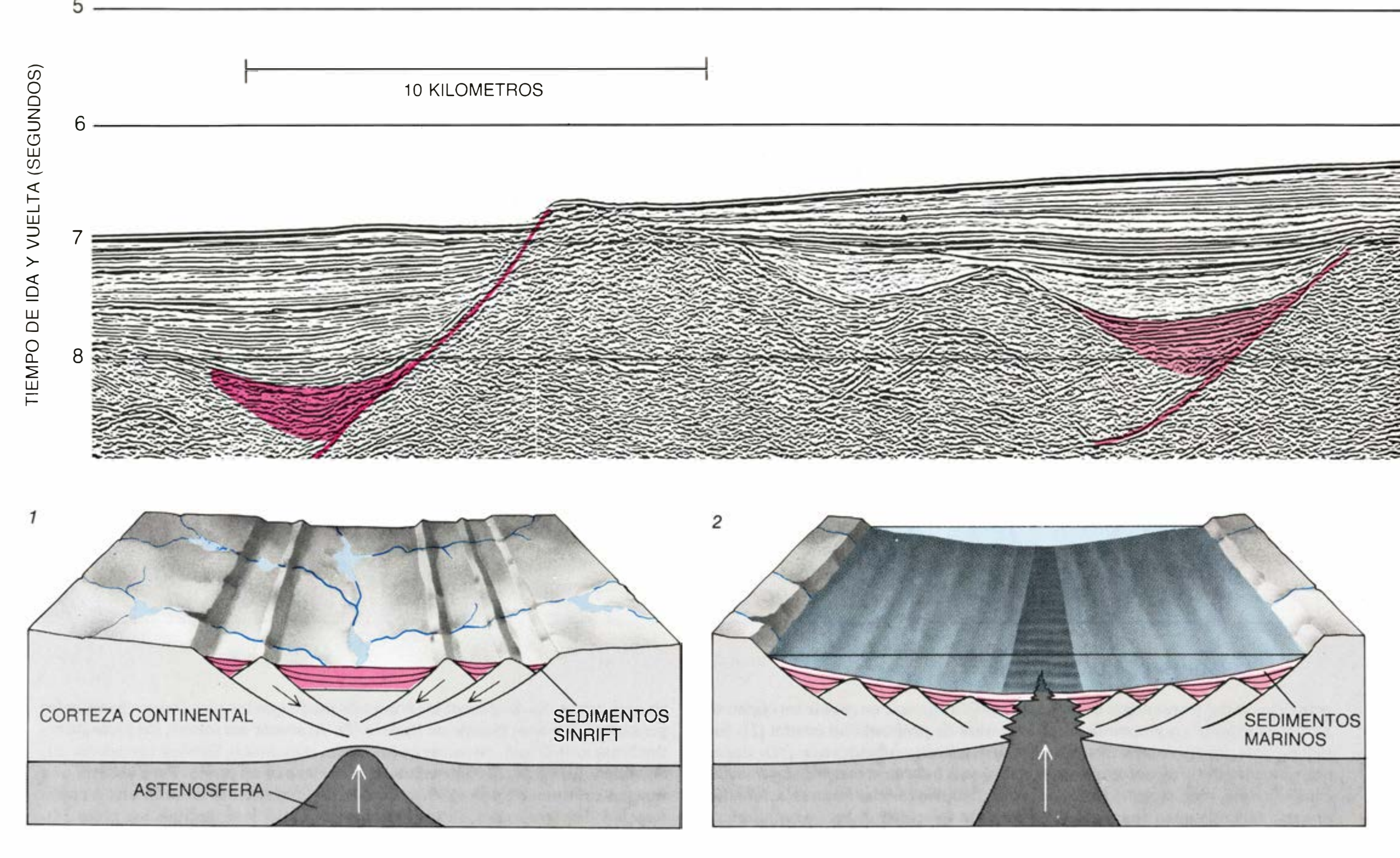
No puede aún procederse a la suma de las trazas. Las reflexiones procedentes de una misma capa de rocas emplean tiempos distintos para alcanzar los diferentes canales del serpentín; por ejemplo, la señal registrada por el último canal del serpentín ha recorrido una trayectoria mucho más larga que la que llega al canal más próximo al cañón de aire comprimido. En principio, por tanto, los picos de reflexión de las diferentes trazas no están en fase. Se consigue que lo estén desplazando el tiempo de llegada de cada máximo respecto de un patrón temporal de referencia: el tiempo de llegada que le correspondería de haber efectuado las ondas sonoras un viaje de ida y vuelta en vertical desde el buque hasta la capa reflectante. Ese tiempo de referencia se denomina tiempo normal.

Ese desplazamiento matemático es viable, pues existe una relación regular entre los tiempos de llegada, a cada canal, de los picos correspondientes. El tiempo de llegada depende de la distancia del canal a los cañones de aire comprimido (la compensación) y de las velocidades sísmicas en todos los estratos, incluida el agua situada sobre la capa reflectante. Para simplificar los cálculos se sustituyen las velocidades por una única magnitud, denominada velocidad cuadrática media (CM): el cuadrado del promedio de las velocidades individuales ponderadas según el tiempo invertido en cada capa.

Cuando da comienzo el análisis de una muestra de punto de profundidad común se desconocen los tiempos de llegada de los picos de reflexión y sus correspondientes velocidades CM. Por regla general, en las trazas no se distinguen del ruido los picos de reflexión. El ordenador descubre los picos de reflexión y las velocidades CM a través de una búsqueda por tanteo; en efecto, desciende por el eje de tiempos de llegada y, deteniéndose a intervalos regulares, examina todas las trazas según el eje de compensación (el eje x). En cada intervalo de tiempo, el ordenador busca un conjunto "coherente" de picos: picos cuyos tiempos de llegada estén especificados por la misma velocidad CM, y que, por tanto, derivarán de señales que han atravesado las mismas capas y se han reflejado en el mismo límite del subsuelo marino.

El ordenador repite ese procedimiento hasta que llega al pie de las trazas. Se emplean entonces las velocidades CM para desplazar los tiempos de llegada al tiempo normal. Por último se suman las trazas. Se sumarán y amplificarán los picos de reflexión que estén en fase, mientras que tenderá a desaparecer el ruido fortuito. Con ello se obtiene un perfil realzado de la corteza en un punto. Las imágenes que acompañan este artículo se han elaborado a partir de miles de perfiles semejantes, colocados uno al lado del otro de modo que coincidan los picos, oscurecidos, que a veces definen límites de reflexión continuos.

Lo normal no es trazar la posición de un límite de acuerdo con su profundidad, sino conforme a los tiempos de ida y vuelta de las reflexiones. Para determinar la profundidad de un reflector deben conocerse también las velocidades sísmicas en cada una de las capas de roca situadas por encima del mismo. Pueden éstas estimarse a partir de las velocidades CM. En la búsqueda de un límite de reflexión el ordenador determina la velocidad CM de todas las capas situadas sobre el límite. Puesto que se conoce la velocidad del sonido en el agua marina (la primera capa), cabe deducir, una a una y a partir de las velocidades CM, las velocidades de las capas de profundidad creciente. El análisis no se limita a ofrecernos la profundidad de los límites de reflexión: la velocidad sísmica de un estrato rocoso



constituye un importante indicio de su composición.

Realce

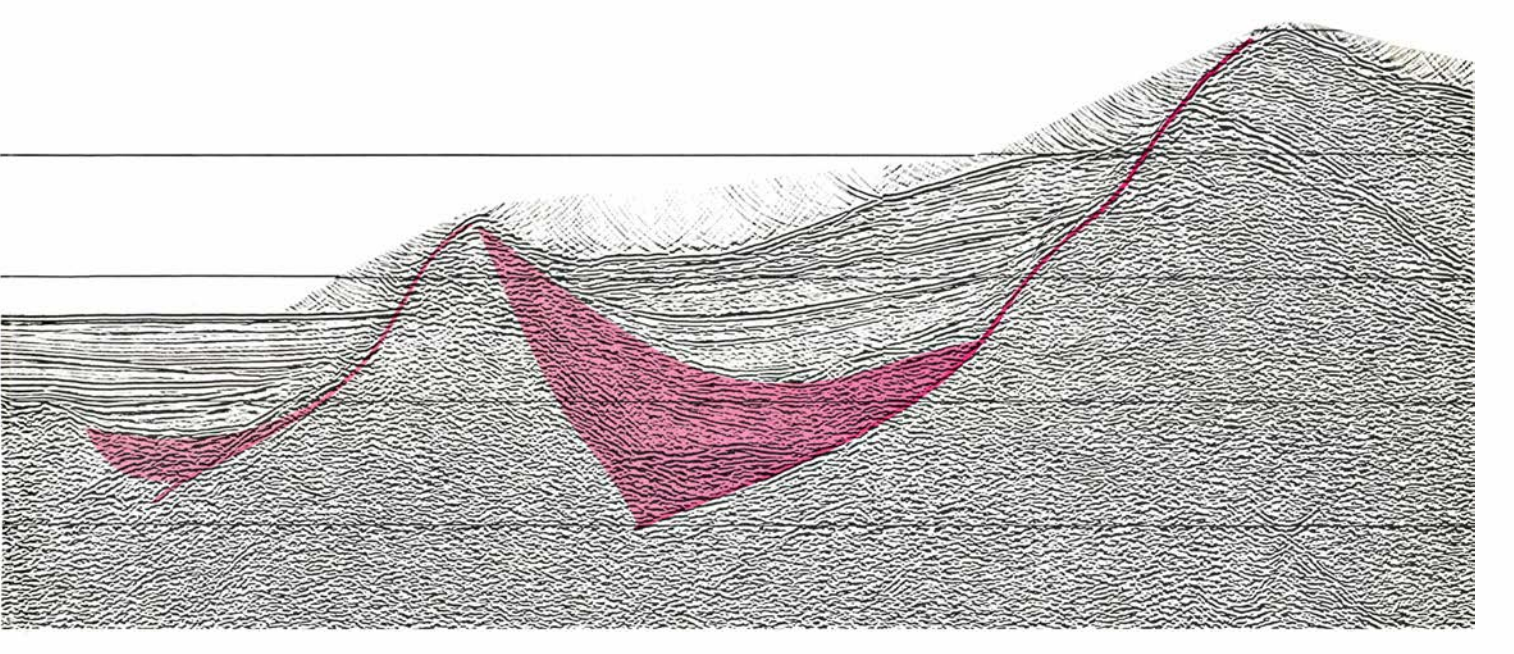
Son muchos los pasos que pueden darse para realzar aún más la imagen multicanal y filtrar ruidos exteriores. Quisiera mencionar uno de ellos. No cabe duda de que la calidad del perfil de un punto de profundidad común aumenta con el número de señales que comprenda y, por consiguiente, con el número de canales utilizado. Ello es especialmente cierto en el caso de los perfiles de las capas más profundas de la corteza, cuyas señales de reflexión son muy débiles. Con nuestro serpentín de 48 canales solemos detectar la base de la corteza, la discontinuidad de Mohorovičić; se trata de un reflector bastante intenso, gracias al contraste físico, notable, entre la corteza y el manto superior. Sin embargo, dentro de la corteza profunda son pocos los límites reflectantes. El zócalo inferior de las capas sedimentarias está formado por rocas ígneas, cuyas propiedades físicas son casi uniformes o cambian sólo gradualmente con la profundidad. Los 48 canales no bastan para resolver la estructura interna del zócalo ígneo, ni siquiera para rastrear la discontinuidad de Moho en sus puntos más profundos.

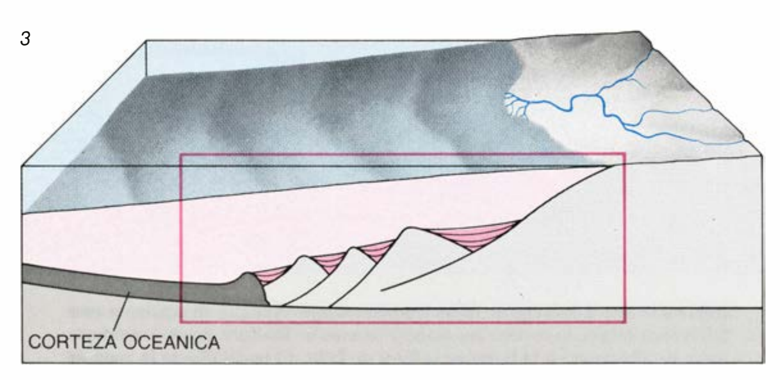
Para añadir canales basta con hacer más largo el serpentín. Pero así aumentamos la probabilidad de topar con dificultades técnicas que retarden la recogida de datos. Peter Buhl y sus colegas, del Lamont-Doherty, han desarrollado un procedimiento para simular un serpentín largo: se trata de formar un equipo de dos buques, cada uno equipado con cañones de aire comprimido y un serpentín. Navegan siguiendo el mismo curso, uno tras el otro, y disparando alternativamente sus cañones. Cada barco registra las reflexiones de sus propios disparos y las producidas por los disparos del otro. Si ambos arrastran 2,4 kilómetros de serpentín, cada uno con 48 canales, y la nave de cola se mantiene a 2,4 kilómetros del final del serpentín de la de cabeza, el conjunto simula un solo serpetín de 7,2 kilómetros, con 144 canales. Se denomina esa técnica obtención de perfiles de gran apertura para puntos de profundidad común.

Bien sea con uno o con dos buques, puede mantenerse el ciclo de disparo y registro de las reflexiones en tanto el estado de la mar no obligue a la tripulación a recoger los serpentines. En cuestión de días, manteniendo los barcos una velocidad de cinco nudos, se recogen datos suficientes para construir una imagen que resiga la estructura de la corteza a lo largo de centenares de kilómetros en la derrota de navegación. Por consiguiente, la obtención de perfiles por reflexión multicanal constituye una herramienta adecuada para el análisis de la corteza en busca de los efectos de gran escala del movimiento de placas.

Zonas de subducción

Las placas, que en conjunto constituyen la litosfera rígida, se mueven sobre una capa del manto parcialmente fundida, la astenosfera. La corteza no es más que la porción superior de la litosfera; las placas tienen entre 75 y 150 kilómetros de potencia e incluyen una parte significativa del manto superior. Donde convergen dos placas, una se sumerge bajo la otra y se subduce en la astenosfera. ¿Qué le sucede a la corteza? La mayor parte suele hundirse en la astenosfera junto con la placa subducida. Sin embargo, algunas de las ca-





3. FORMACION DE UN VALLE DE FRACTURA CONTINENTAL. Se cree que deriva del estiramiento y adelgazamiento de la litosfera a lo largo de millones de años. Cuando se estiran las capas superiores de la corteza continental, la fragilidad de ésta determina el deslizamiento de bloques enteros a lo largo de planos de falla curvos, produciéndose una serie de prominencias y cuencas (*1*). A medida que se hunde la corteza durante el proceso de formación del valle, las cuencas se rellenan de sedimentos coetáneos con la formación del rift (sedimentos sinrift), erosionados de los bloques fallados y de los continentes y depositados en lagos. Si persiste el estiramiento, la placa adelgazada se separa en dos expansivas (*2*) y aparece una nueva cuenca oceánica (*3*). Los sedimentos coetáneos con la formación del rift quedan cubiertos de nuevos sedimentos marinos. En una imagen sísmica multicanal del margen continental de la costa de España destacan las fallas curvas originadas por estiramiento (*color oscuro*). Las capas sinrift de las cuencas (*color intermedio*) convergen hacia la parte superior de los bloques, señal de que se depositaron durante el deslizamiento de los bloques. La cubierta de sedimentos marinos se acumuló después de la formación del rift.

pas sedimentarias superiores se separan a veces de la placa descendente por el raspado que efectúa la placa cabalgante. En particular, las capas mal consolidadas de material empapado del fondo oceánico se separan de las rocas inferiores, más rígidas, como lo hace la nieve al paso de una máquina quitanieves. Los sedimentos se apilan delante de la placa cabalgante, formando lo que se llama un prisma de acreción.

Los perfiles de reflexión del Caribe realizados por John W. Ladd, de Lamont-Doherty, ilustran vivamente ese proceso [*véase la figura 1*]. En el margen continental de Venezuela la placa del Caribe se sumerge bajo la placa de América del Sur. La corteza que penetra en la zona de subducción consta de sedimentos no deformados, dispuestos en capas, de los cuales los más profundos tienen casi 85 millones de años de antigüedad y se encuentran sobre un zócalo basáltico. En los perfiles destaca un reflector, denominado A″, a una profundidad bajo el nivel del mar de casi siete kilómetros, equivalente a una edad de 37 millones de años. A partir de las muestras de sondeo se sabe que las capas sedimentarias situadas bajo el horizonte A″ son formaciones muy litificadas de creta y caliza. Por el contrario, sobre la capa de reflexión aparece una secuencia poco consolidada de arcillas y turbiditas (sedimentos procedentes de la erosión del continente y de la plataforma continental).

El comienzo de la zona de subducción lo marca la prominencia de Curaçao, de suave pendiente. El horizonte A″ continúa hacia tierra, bajo la prominencia, al menos a lo largo de 50 kilómetros. Parece estar ligeramente distorsionado, pero su estructura global se reconoce sin dificultad. Los sedimentos situados bajo el horizonte parecen prolongarse, intactos, hasta la zona de subducción y probablemente se destruyan en el manto junto con el zócalo cortical y el resto de la litosfera subducida. Por el contrario, los sedimentos superpuestos al horizonte A″ experimentan, debajo mismo de la prominencia, un cambio brusco: las capas, sin modificar hasta entonces, se transforman en una masa caótica, carente de rasgos. En la prominencia de Curaçao apenas se advierte estructura interna. Diríase que se trata de un apilamiento de sedimentos barridos por la placa Sudamericana.

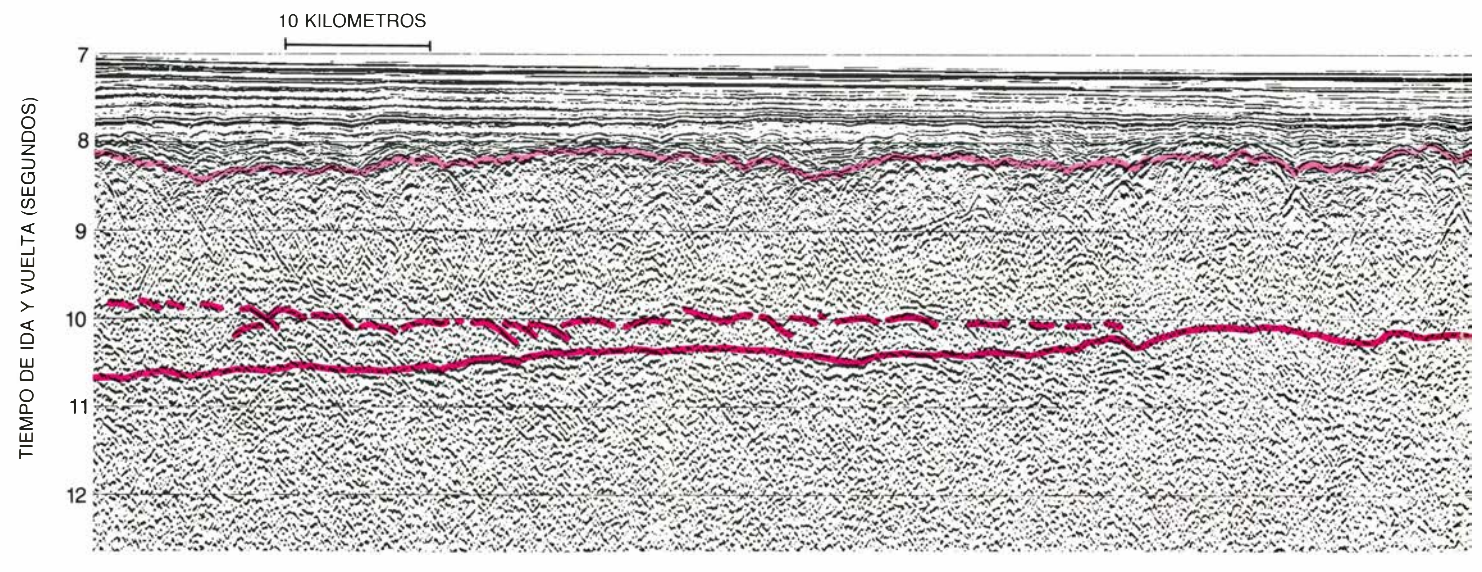
Otros prismas de acreción se desarrollan de forma más sistemática. Ejemplo de ello es el prisma de la fosa de Nanki, de la fosa del Japón, donde la placa Pacífica, que avanza hacia el oeste, se hunde bajo las placas euroasiáticas. (Las profundas fosas oceánicas del Pacífico occidental, son, todas ellas, zonas de subducción.) La mayoría de los sedimentos de la fosa de Nanki parecen haber penetrado cierta distancia en la zona de subducción. Pierden agua y se comprimen y consolidan.

En última instancia, una cuña de sedimentos comprimidos cae por la falla, que se encuentra ligeramente inclinada. Se separa así del sedimento no consolidado que le sigue por la placa descendente. Este último sedimento, más joven, se ve desplazado entonces a lo largo del plano de falla, bajo la cuña comprimida. También se comprime hasta desprender una nueva cuña. De esta manera, las sucesivas cuñas de sedimento van sumándose al prisma de acreción (disponiéndose el nuevo material por debajo del antiguo) que gradualmente se eleva e inclina. En los perfiles de reflexión de la fosa de Nanki los cabalgamientos entre cuñas sedimentarias constituyen intensos límites de reflexión.

Tanto en la fosa de Nanki como en el Caribe, parte de los sedimentos de las placas descendentes se subducen. En otras zonas de subducción la placa cabalgante determina la acreción de todo el sedimento. En un tercer tipo se subduce el sedimento entero; de hecho, señalan las pruebas que en algunos casos la placa descendente llega a erosionar material del frente de la placa cabalgante. Los perfiles de reflexión por multicanal han demostrado que no hay dos zonas de subducción exactamente iguales, lo que mueve a preguntarse por la razón de sus diferencias. El destino de la corteza quizá dependa de la velocidad de convergencia de las dos placas; ahora bien, por sí solo, ese factor no explica la variedad de estructuras corticales observadas. No se ha encontrado hasta ahora respuesta satisfactoria a esa cuestión.

Valles de fractura

¿Cómo se inicia la convergencia de placas? Pocas son las pruebas en las que fundamentar una explicación: en todos los casos, la mayoría de las estructuras creadas durante el período inicial de convergencia se han subducido. La formación de un borde de placa divergente, en cambio, está relativamente bien documentada. Por ejemplo, para interpretar el proceso de separación de Norteamérica y Europa por obra de un valle de fractura (o rift), basta estudiar los márgenes de esos



4. ZONAS DE FRACTURA OCEANICA. Se recogen en las imágenes sísmicas multicanal a modo de regiones de corteza adelgazada. Donde una zona de fractura seca una dorsal mesoceánica, las dos placas divergentes se deslizan una frente a la otra a lo largo de fallas transformantes. Aunque en ocasiones esas fallas sean cortas, la corteza anómala de la zona de fractura puede extenderse miles de kilómetros a lo largo de la línea de falla. El perfil dibuja la zona de

continentes, que conservan todavía señales de ese proceso.

En la formación de un valle de fractura participa la litosfera entera, no sólo la corteza. Se cree que la placa no se fractura de forma instantánea. Antes, durante un período de millones de años, se estira y adelgaza. Las pruebas de ese estiramiento son, a menudo, indirectas: proceden de la observación de cuencas sedimentarias, como el mar del Norte. De acuerdo con los cálculos teóricos de D. P. MacKenzie, de la Universidad de Cambridge, pueden formarse cuencas sedimentarias cuando el suelo de una placa adelgazada se sustituye por material caliente procedente de la astenosfera. A medida que se enfría, el material caliente se contrae, provocando la subsidencia de la litosfera. Según esta interpretación, muchas cuencas sedimentarias serían valles de fractura continentales abortados o rifts en formación.

Si la litosfera se tensa lentamente antes de abrirse el valle, en la estructura de la corteza de los márgenes continentales debería hallarse más pruebas directas del proceso. Lucien Montadert, del Instituto Francés del Petróleo, David Roberts, de la British Petroleum de Londres, y sus colegas han hallado ese tipo de indicaciones en los perfiles de reflexión de los márgenes de Francia, España y Portugal [*véase la figura 3*]. Las formaciones de su zócalo se han fragmentado en bloques escalonados. En el lado próximo a tierra los bloques están limitados por fallas que, cerca de la superficie, tienen un buzamiento muy pronunciado, pero que se curvan luego, formándose casi horizontales en profundidad (precisamente el tipo de fracturación que cabe esperar en materiales quebradizos sujetos a una fuerte tensión de dilatación). Al separarse Europa y América del Norte, razonan Montadert y Roberts, los bloques delimitados por fallas se deslizaron a lo largo de los planos curvos, formando una serie de elevaciones y depresiones escalonadas.

Los sedimentos depositados en las depresiones confirman que la litosfera se tensó lentamente antes de su fragmentación. Las capas convergen hacia la zona superior de los bloques, señal de que se depositaron mientras los bloques aún se movían. Las muestras de sondeo indican que esos sedimentos "sinrift" contienen restos erosionados de los bloques del basamento. Es más, las muestras permiten la datación de los sedimentos: se depositaron durante un período de aproximadamente 10 millones de años, justo antes de que se formara la más antigua corteza del Atlántico. (La formación de corteza en un nuevo centro de expansión mesoceánico indica que el proceso de la apertura del valle de fractura se ha completado y que las placas comienzan a divergir.) A partir de los depósitos cosedimentarios del rift se deduce que la separación de Europa y América, que a la altura de Francia y España se inició hace aproximadamente 110 millones de años, estuvo precedida, como mínimo, de 10 millones de años de adelgazamiento de la corteza. Tras cesar el proceso de apertura y hundirse los márgenes continentales por debajo del nivel del mar, los sedimentos sinrift quedaron cubiertos de capas horizontales de sedimentos atribuibles a la lluvia constante de plantas pelágicas y de animales caídos sobre el fondo del mar.

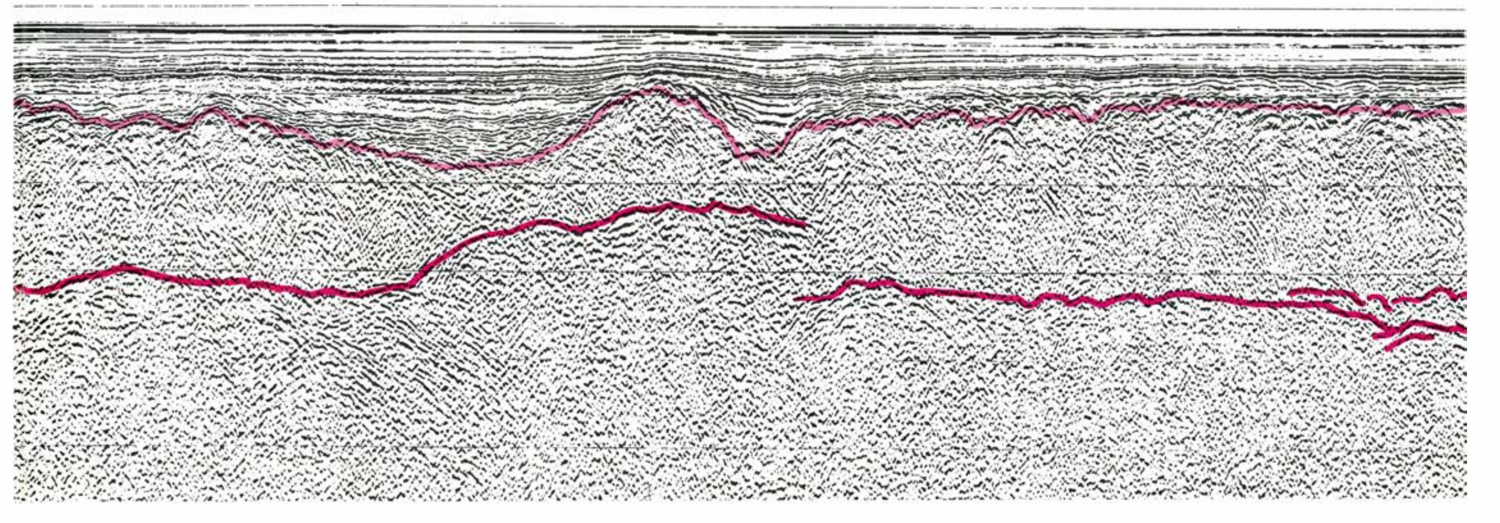
La conexión entre el adelgazamiento y la divergencia de placas no siempre resulta tan directa. Frente a Noruega, por ejemplo, la corteza del margen continental muestra claros indicios de haberse adelgazado, pero ello tuvo lugar 80 millones de años antes del comienzo de la expansión del fondo oceánico. El zócalo fallado en bloques y los sedimentos de tipo sinrift tienen aproximadamente 135 millones de años, mientras que la corteza oceánica más antigua del mar de Noruega y Groenlandia data de hace sólo 59 millones de años. En el ínterin se acumularon capas horizontales de sedimentos sobre las secuencias sinrift. Apenas se deformaron esas capas al completarse la fracturación, pues no precisaron posteriores adelgazamientos. Aparentemente, la litosfera menguó su espesor, casi hasta el punto de ruptura, se mantuvo en ese estado durante 80 millones de años y se abrió entonces catastróficamente

Expansión del fondo oceánico

Tras la apertura del valle de fractura, las dos nuevas placas comienzan a divergir. Asciende roca fundida desde la astenosfera, rellenando la abertura y creando nueva litosfera. Una pequeña fracción de material se arroja a la superficie en forma de lava; el resto solidifica y se agrega al borde de la placa en expansión. Los perfiles de los márgenes continentales, entre ellos el de Noruega, sugieren que la actividad volcánica es más intensa durante los primeros millones de años de expansión del fondo oceánico.

A medida que la litosfera va alejándose de la dorsal mesoceánica sigue enfriándose, contrayéndose y hundién-





fractura de Blake Spur, a unos 1000 kilómetros al este de Florida. La línea de color claro marca el límite entre los sedimentos y el zócalo rocoso, que se formó en la dorsal mesoatlántica hace 130 millones de años. Cerca la zona de fractura la corteza se adelgaza por debajo. La discontinuidad de Mohorovičić (*línea de color oscura*), que marca la base de la corteza, asciende bruscamente, desapareciendo el reflector interno denominado horizonte *R* (*color a trazos*).

dose. Los abismos más profundos del Atlántico se encuentran junto a los márgenes continentales, donde la litosfera alcanza su mayor edad y se ha enfriado durante más tiempo. Frente a los márgenes noruegos, sin embargo, el fondo marino es anormalmente somero. Las muestras extraídas del lugar atestiguan que, en efecto, se trata de corteza oceánica; se ha comprobado mediante el trazado de perfiles sísmicos que su grosor es el doble de lo que le corresponde a una corteza que (junto con el resto de la litosfera) se haya enfriado y contraído a lo largo de cerca de 60 millones de años. Al crearse esa capa, durante los tres o cinco primeros millones de años de expansión, el magma debió manar por la dorsal en una tasa muy superior a la normal.

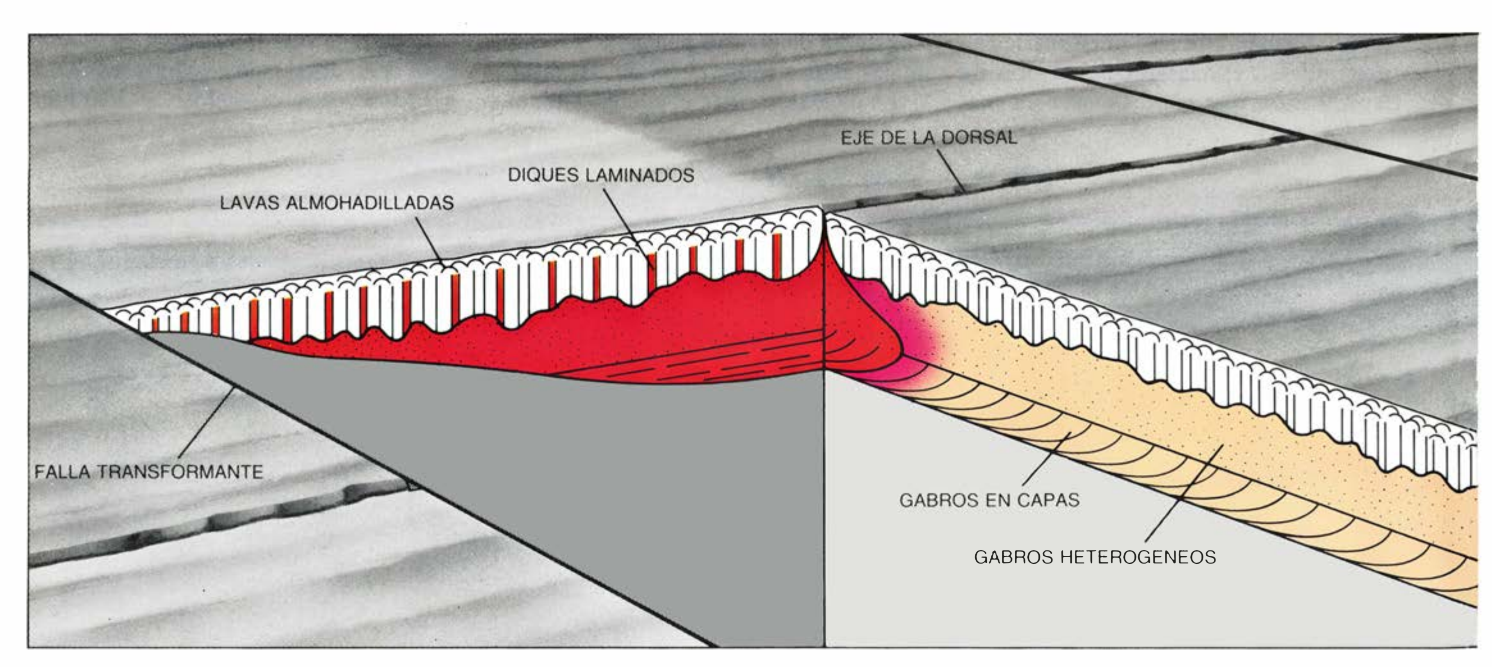
En efecto, los perfiles del margen de Noruega trazados por reflexión multicanal sugieren que la erupción fue lo suficientemente intensa para levantar la dorsal por encima del nivel del mar. Los perfiles revelan una estructura interna característica en la parte superior del zócalo: se trata de un apilamiento de capas curvadas que descienden lentamente hacia el mar. Manik Talwani, de la Universidad de Rice, y el autor propusieron que las capas debieron formarlas sucesivas coladas volcánicas procedentes de un centro de expansión que se hallaría al descubierto. (La lava vertida por erupción de un centro de expansión sumergido se enfría y solidifica en almohadillas sin alejarse de la boca de donde mana.) La hipótesis explica la inclinación de las capas hacia el mar: la mayor parte de la lava se solidificó, en cada erupción, cerca del punto de salida, con lo que la carga acumulada en cada episodio eruptivo sobre las capas infrayacentes se hizo cada vez mayor hacia el centro de expansión. Igual está ocurriendo hoy en Islandia, donde la dorsal mesoatlántica se encuentra por encima del nivel del mar. Las capas de lava del este de Islandia presentan una estructura similar a las de la corteza del margen noruego.

Mediante el análisis de perfiles sísmicos por multicanal, Karl Hinz, del Instituto Federal de Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales de Hanover, ha encontrado secuencias de lava inclinada en los márgenes continentales de todo el mundo, de la Antártida a la India. No cabe ya duda de que los primeros estadios de la evolución de muchos centros de expansión se caracterizaron por un intenso vulcanismo. En la mayoría de los casos dicha actividad probablemente disminuiría a partir de los primeros millones de años. Luego, el centro de expansión, al que el magma ascendente ya no mantendría a flote, se sumergería bajo el mar. La lava que aún se vertiera comenzaría a apilarse en almohadillas, según se aprecia, típicamente, en las dorsales mesoceánicas.

Cámaras magmáticas

Disputan los geólogos sobre la estructura detallada de los centros de expansión. Coinciden todos en que la dorsal mesoceánica se alimenta a partir de una cámara de magma persistente, situada en el interior de la corteza. Los estudios de ofiolitas (fragmentos de corteza oceánica incrustados en tierra firme por los movimientos de placas) avalan tal suposición. Las secciones basales de las ofiolitas suelen estar compuestas de gabros en capas: rocas plutónicas de grano grueso que, según se cree, se enfriaron y cristalizaron lentamente a varios kilómetros de profundidad. Difícilmente se explicaría la formación de gabros en capa de no admitirse la existencia de una cámara magmática varios kilómetros por debajo de la dorsal. En esas cámaras los minerales pueden cristalizar fraccionadamente a partir de la masa fundida, creando estructuras en capas que posteriormente las placas divergentes arrastrarán muy lejos. Periódicamente, la cámara se reaprovisionaría de magma procedente de la astenosfera.

Norman H. Sleep, de la Universidad de Stanford, y Bruce R. Rosendahl, de Duke, han inferido un modelo térmico para los centros de expansión en el que se postula también la presencia de cámaras magmáticas. Como cabía esperar, propone la existencia de grandes cámaras magmáticas bajo las dorsales donde se crea litosfera con gran rapidez, unos cinco centímetros por año, y las supone angostas en los centros de expansión lenta. Sostiene que la cámara magmática que subyace a un centro de expansión rápida tiene forma de

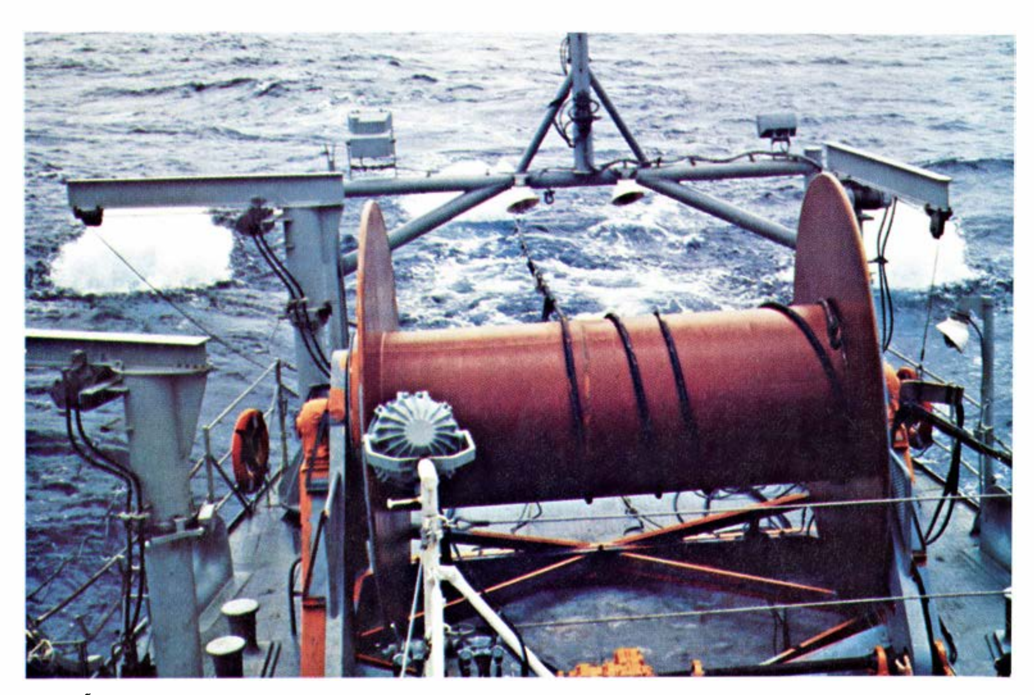


5. CAMARA MAGMATICA subyacente a una dorsal mesoceánica. Quizá explique el adelgazamiento de la corteza en las zonas de fractura. Según se cree, la mayor parte de la corteza oceánica se forma por enfriamiento y cristalización del magma en esas cámaras; sólo una pequeña porción del magma aflora en forma de lavas almohadilladas. El horizonte *R* bien podría representar el límite entre los gabros heterogéneos, formados por el magma enfriado cerca de las paredes y techo de la cámara, y los gabros en capa, constituidos a partir de los minerales que se han decantado en el fondo. El Moho constituye la base de la cámara magmática. Cada segmento de dorsal separado por zonas de fractura se alimentaría de una cámara magmática distinta, localizada bajo el centro del

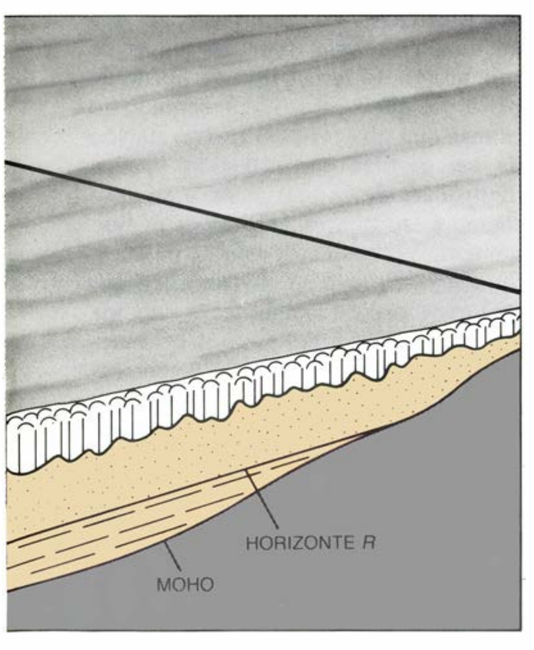
cuña: 20 kilómetros de anchura en su base y sólo pocos kilómetros en el techo.

Cualquier cámara magmática de grandes proporciones debería, en principio, quedar reflejada en los perfiles sísmicos, puesto que el magma tiene una velocidad sísmica muy inferior a la de las rocas sólidas circundantes. Por consiguiente, en un perfil de reflexión deberían recogerse las reflexiones del techo de la cámara. Se recaban más pruebas aplicando una técnica sísmica distinta, en la que se detectan las ondas sonoras refractadas. En la mayor parte de la corteza, la velocidad de las ondas sísmicas crece con la profundidad; una onda sonora que penetre en la corteza sin reflejarse se refractará hacia la horizontal en cada límite que atraviese, hasta propagarse horizontalmente por uno de ellos; se refracta luego de nuevo hacia la superficie y aquí se la detecta. Cuanto más profundo sea el límite por el que se desplaza en horizontal, tanto más lejos reaparecerá en la superficie. Las ondas sonoras que penetran en una zona magmática de baja velocidad no tienden a la horizontal, sino que se refractan hacia abajo, alejándose de los detectores. Las cámaras magmáticas se manifiestan así como "zonas de sombra" en los perfiles que recogen las señales refractadas. La intensidad de la señal se reduce drásticamente a la distancia de detección correspondiente a la profundidad de la cámara.

Valiéndose de instrumentos colocados sobre el fondo marino y de explosivos, John A. Orcutt y sus colaboradores, de la Institución Oceanográfica Scripps, detectaron una zona de sombra debajo de la dorsal del Pacífico oriental, uno de los centros de expansión más rápidos del mundo. Posteriormente, el equipo del Lamont-Doherty dirigido por Thomas J. Herron detectó un reflector característico en un perfil por multicanal de la cresta de la dorsal, cerca de donde Orcutt realizó sus experimentos. La profundidad del reflector corresponde casi exactamente al techo de la zona de sombra de Orcutt. Juntos, esos dos resultados constituyen una prueba incuestionable de la existencia de algún tipo de cámara magmática bajo esa dorsal.



6. CAÑONES DE AIRE COMPRIMIDO arrastrados por el buque *Robert D. Conrad*. Se disparan aproximadamente cada 20 segundos. Las reflexiones del fondo marino y de los límites subyacentes se detectan con un serpentín de 2,4 kilómetros desplegado desde una bobina y arrastrado por debajo de la superficie.



segmento en cuestión. Cerca de las zonas de fractura la cámara se reduce y su presencia se torna intermitente; la corteza aparece, por tanto, mucho más delgada, desapareciendo el horizonte *R* y los gabros en capa. (Los dibujos son obra de George Retseck.)

Sin embargo, la cámara magmática no parece tener las dimensiones presumibles en un centro de expansión rápida. El pasado verano, Orcutt, Robert S. Detrick, de la Universidad de Rhode Island, Thomas Brocher, de la Institución Oceanográfica Woods Hole, Peter Buhl y el autor trazaron varios perfiles de la dorsal; habían recopilado para ello datos de reflexión y refracción obtenidos con métodos de alta resolución en los que participaron dos buques. Un primer análisis de los datos ponía de manifiesto la existencia de una zona de sombra, exclusivamente bajo la cresta de la dorsal. De acuerdo con dicho análisis, la cámara magmática situada bajo esa zona de la dorsal sólo alcanza unos pocos kilómetros de anchura. Ello contradice la versión de los estudios de ofiolitas y el modelo teórico de Sleep, que le conceden a la cámara un diámetro del orden de los 20 kilómetros. No se sabe aún cómo resolver el conflicto que enfrenta a las deducciones geológicas con las observaciones sismológicas; argumenta Sleep que quizá la circulación del agua marina por la corteza haya enfriado y reducido la cámara magmática.

Corteza antigua

Los esfuerzos por obtener imágenes claras de la corteza subyacente bajo una dorsal mesoceánica tropiezan siempre con el carácter extremadamente accidentado del terreno: gran parte de la energía sonora que penetraría en una superficie llana se disipa estocásticamente en las de relieve irregular. Eludiremos el problema, sin por ello dejar de concentrarse en la misma cuestión (cómo se forma la corteza), estudiando la corteza lejos de la dorsal, donde se encuentra recubierta por un liso manto de sedimentos. La estructura de la corteza informa de las características de la dorsal, si bien éstas corresponden a las que predominaron hace muchos millones de años. Aplicando la técnica de gran apertura, mis colegas y yo hemos obtenido perfiles por reflexión multicanal del trayecto entero que va desde Florida hasta la dorsal mesoatlántica, desde la más antigua a la más moderna corteza atlántica. Esos perfiles han aportado pruebas indirectas de la presencia de una cámara magmática bajo la dorsal.

En nuestros perfiles se detecta, sin solución y a lo largo de grandes distancias, la discontinuidad de Mohorovičić, a una profundidad casi constante, comprendida entre los 12 y 15 kilómetros bajo el nivel del mar. Su reflectividad también es razonablemente uniforme. Cualquiera que sea el proceso que

forma la corteza inferior, en el Atlántico norte parece haberse mantenido casi invariable durante los últimos 100 millones de años. Lo cual apoya la idea de que el centro de expansión se alimenta de una cámara magmática estable. Si la corteza derivara de episódicas inyecciones de magma procedentes del manto, como algunos investigadores han supuesto, el Moho no sería tan uniforme y continuo.

Otro rasgo de los perfiles viene a probar la existencia de una cámara magmática. Unos tres kilómetros por encima del Moho aparece bruscamente un límite interno de reflexión; lo llamaré horizonte *R*. A diferencia del Moho, no es uniforme ni continuo, señal de que el límite de propiedades físicas al que representa ni es constante en profundidad ni lateralmente uniforme. Opino que el horizonte *R* debe representar el límite en una cámara magmática: el límite entre los gabros en capa (que se forman cuando los minerales cristalizan fraccionadamente a partir del magma y se posan en la base de la cámara) y los gabros más heterogéneos, que cristalizan junto a las paredes laterales y el techo de la cámara. El contraste físico entre esos tipos de roca es pequeño, aunque suficiente para producir una reflexión en las imágenes de gran apertura.

Zonas de fractura

La estructura de la corteza profunda, como revelan el horizonte *R* y el Moho, experimenta un notable cambio en las inmediaciones de una zona de fractura oceánica. Una zona de fractura viene a ser, en parte, un desencajamiento en una dorsal mesoceánica. El acodo es una falla transformante donde las dos placas divergentes se deslizan una frente a la otra. A cada lado de la dorsal, y en miles de kilómetros a lo largo de la línea de desencajamiento, se reconocen los accidentes corticales generados en la falla transformante. Nuestros perfiles del Atlántico norte atraviesan varias zonas de fractura a cierta distancia de la dorsal [*véase la figura 4*].

Hemos descubierto que la corteza pierde progresivamente grosor a medida que se aproxima a una zona de fractura. Parece adelgazarse por debajo: la capa situada entre el horizonte *R* y el Moho se acuña conforme asciende el Moho. Bajo la zona de fractura el horizonte *R* desaparece. Por debajo de la zona de fractura de Blake Spur, por ejemplo, la discontinuidad de Mohorovičić asciende bruscamente, hasta situarse por encima de la profundidad propia del horizonte *R*. El espesor de la porción ígnea de la corteza pierde dos o tres kilómetros, justo la mitad de su valor normal. El mayor espesor cortical se encuentra a media distancia entre zonas de fractura.

El modelo responde a una explicación sencilla, basada en una idea avanzada por Hans Schouten, de Woods Hole. Cada segmento de la dorsal se alimentaría de una cámara magmática distinta, situada aproximadamente a medio camino entre dos zonas de fractura. Hacia las zonas de fractura la cámara magmática se reduce progresivamente. En una cámara pequeña no queda espacio para que cristalicen muchos minerales a partir del fundido, por lo que no aparecen gabros en capas (que forman la corteza situada entre el horizonte *R* y el Moho). Puede que bajo las fallas transformantes ni siquiera exista cámara magmática; se detendría por completo el proceso normal de acreción cortical. La hipótesis se apoya en pruebas geoquímicas: las rocas que nacen de erupciones a lo largo de distintos segmentos de la dorsal presentan diferencias químicas. Con todo, la hipótesis debe considerarse provisional.

Perspectivas

El conocimiento de la estructura interna de las zonas de fractura y dorsales mesoceánicas es todavía limitado, por la sencilla razón de que se dispone de pocas imágenes sísmicas de sus niveles más profundos. Lo mismo vale, aunque en menor medida, para las zonas de subducción, el tercer tipo de borde de placa. Lo que aquí se ha presentado no es más que una primera interpretación de los perfiles por reflexión sísmica multicanal; en lo que atañe a su aplicación a las cuestiones geológicas fundamentales, la técnica está en pañales. Sin duda, la calidad de las imágenes mejorará progresivamente, a medida que se vayan dotando mejor las baterías de cañones, haya más detectores de sonido y se apliquen métodos más refinados al tratamiento de las señales. De importancia comparable para la interpretación de los vastos procesos dinámicos que se dan en la tierra resulta la cantidad de imágenes de que se disponga. A la pequeña cohorte de investigadores empeñados en el levantamiento de perfiles de la corteza que subyace al suelo oceánico le aguardan aún muchos cruceros.

El corazón, glándula endocrina

Las aurículas segregan una hormona recientemente descubierta, el factor natriurético auricular, que interactúa con otras hormonas para modular el control de la presión y el volumen sanguíneos

Marc Cantin y Jacques Genest

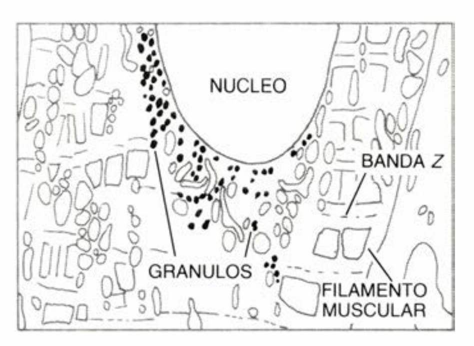
El corazón es una bomba: un órgano muscular que se contrae rítmicamente; envía la sangre hacia los pulmones, para su oxigenación, y luego hacia el sistema vascular, para aportar oxígeno y nutrientes a todas las células del organismo. Se conoce ese hecho desde la publicación, en 1628, del *Ensayo sobre el movimiento del corazón y la sangre en los animales*, de William Harvey.

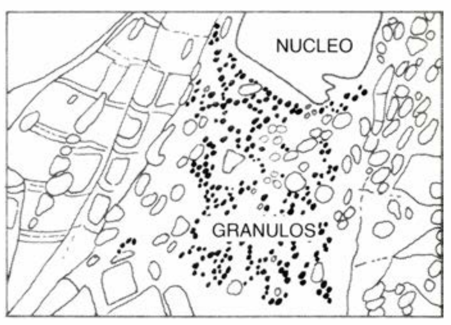
En los últimos años se ha descubierto que el corazón es algo más que eso: es también una glándula endocrina. Segrega una potente hormona peptídica, el factor natriurético auricular (FNA), a la que corresponde un importante papel en la regulación de la presión y el volumen sanguíneos y en la excreción de agua, sodio y potasio. El alcance de sus efectos es amplio: afecta a los propios vasos sanguíneos, a los riñones y las glándulas suprarrenales y a un gran número de regiones reguladoras del cerebro.

El reciente descubrimiento del FNA acabó con un antiguo misterio. Ya en 1935, John Peters, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Yale, planteó la existencia de un mecanismo, ubicado en el propio órgano, o en su proximidad, que "registrara la plenitud de la corriente sanguínea" y modulara la regulación del volumen sanguíneo. Durante las décadas de 1950 y 1960 muchos investigadores buscaron en vano una hipotética "hormona natriurética". Tal hormona explicaría la aparición de natriuresis (excreción de sodio) y la diuresis concomitante (excreción de agua) en ausencia de cambios en los procesos reguladores conocidos. Se observó que tales natriuresis y diuresis inexplicadas seguían a la distensión de las aurículas, las dos cámaras superiores del corazón, que reciben sangre de las venas pulmonares o las venas cavas y la vacían en los ventrículos. Esa supuesta hormona se denominaba "tercer factor", ya que complementaría la actividad de dos conocidos reguladores de la presión y el volumen sanguíneos: la hormona aldosterona y la filtración de sangre por el riñón.

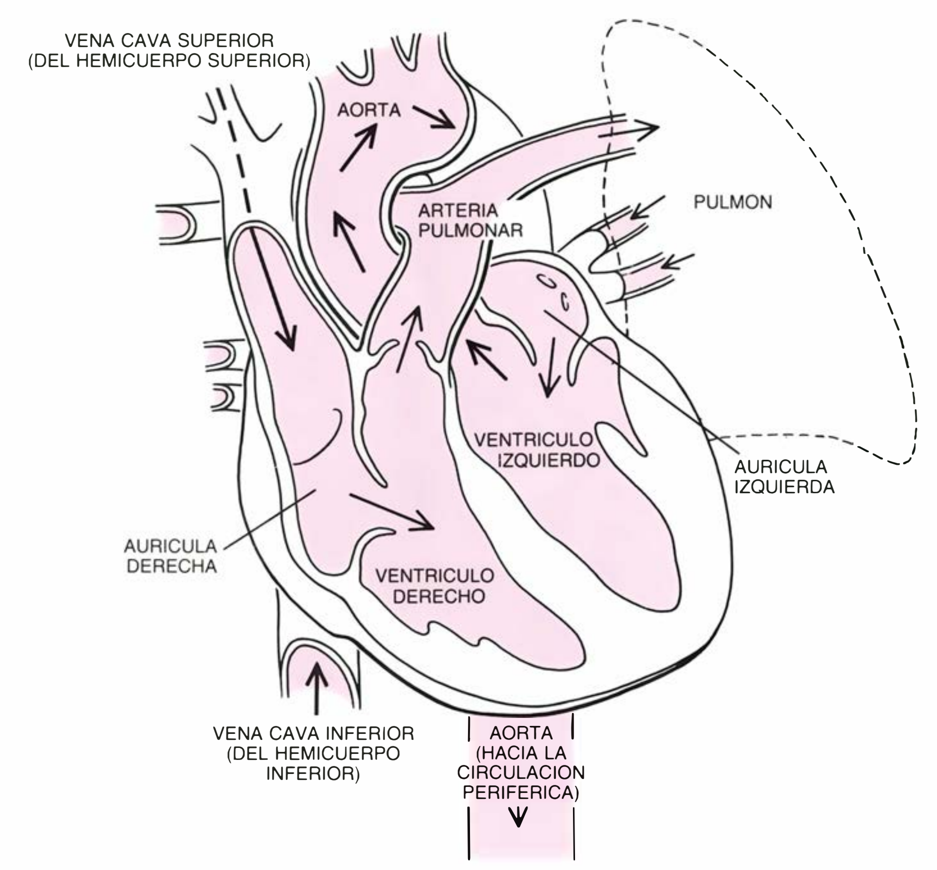
El primer paso hacia el descubrimiento del tercer factor se dio en 1956, cuando Bruno Kisch, del Colegio Americano de Cardiología, observó la presencia de lo que llamó cuerpos densos en los cardiocitos (células musculares cardiacas) de las aurículas de coballas. En 1964, James D. Jamieson y George E. Palade, de la Facultad de Medicina de Yale, informaron que tales cuerpos, cuya función se desconocía, parecían hallarse en las aurículas de todos los mamíferos que examinaron, incluido el hombre. Nuestro grupo de la Universidad de Montreal observó, en 1974, que los gránulos eran muy parecidos a los de almacenamiento de las células endocrinas (secretoras de hormonas) del páncreas o la hipófisis anterior, por ejemplo. Encontramos que, al introducir en los animales aminoácidos marcados radiactivamente, éstos aparecían pronto en los gránulos auriculares, incorporados en polipéptidos (cadenas de las proteínas) de nueva síntesis, igual que sucedería si se tratara de gránulos de almacenamiento de células endocrinas.

En 1976 Pierre-Yves Hatt y sus colegas, de la Universidad de París, correlacionaron lo que entonces se sabía acerca de los gránulos con los hallazgos anteriores sobre la regulación de los niveles de sodio y agua. Demostraron que aumentaba el número de gránulos de los cardiocitos auriculares cuando se reducía la cantidad de sodio de la dieta animal. Lo que implicaba que los gránulos almacenaban alguna sustancia relacionada con el equilibrio del sodio. Adolfo J. de Bold, Harald Sonnenberg y sus colegas, de la Queen's University de Kingston, Ontario, protagonizaron un gran avance en 1981 cuando, tras inyectar en ratas un homogenizado de aurícula de ese animal, observaron el desencadenamiento de diuresis y natriuresis, rápidas, masivas y de corta duración. Concluyeron que las aurículas contenían un "factor" que favorecía esos efectos y lo llamaron factor natriurético auricular.

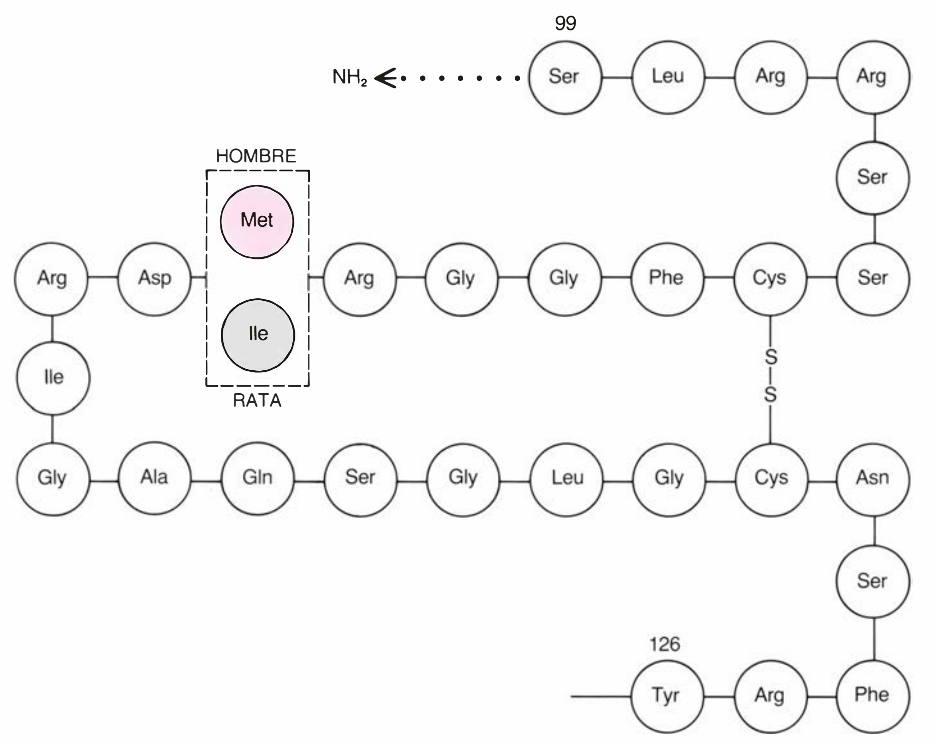




1. GRANULOS DE ALMACENAMIENTO hormonal de los cardiocitos, células musculares cardiacas, en este caso de rata, aumentados unos 12.000 diámetros en estas micrografías electrónicas tomadas en el laboratorio de los autores. El descubrimiento de dichos gránulos sugirió que el corazón era un órgano endocrino. El estiramiento del aparato contráctil del cardiocito (*filamentos con bandas* Z) estimula la liberación de la hormona llamada factor natriurético auricular (FNA). En una célula de rata normal (*arriba*), los gránulos se agrupan cerca del núcleo. En una célula de rata alimentada durante 30 días con una dieta deficiente en sodio (*abajo*), el número de gránulos aumenta, posiblemente debido a la disminución del volumen sanguíneo. La reducción del volumen de sangre rebaja el nivel de FNA circulante, provocando acumulación de gránulos.



2. SECRETAN FNA en los mamíferos los cardiocitos de las aurículas derecha e izquierda del corazón. La sangre que ha agotado su oxígeno en el sistema periférico entra a la aurícula derecha por las grandes venas, se vacía en el ventrículo derecho y se bombea hacia los pulmones a través de la arteria pulmonar. La sangre oxigenada vuelve a la aurícula izquierda y la bombea el ventrículo izquierdo hacia la aorta, desde donde se distribuye a la circulación periférica. En algunas especies no mamíferas, los ventrículos, al igual que las aurículas, presentan actividad diurética y natriurética, por lo que posiblemente también secreten FNA.



3. SECUENCIA DE AMINOACIDOS de la molécula de FNA circulante; parece ser idéntica en el hombre y la rata, salvo en la posición 110, donde el FNA humano tiene metionina y el de rata isoleucina. Las moléculas de FNA activo, tanto del hombre como de la rata, poseen 28 aminoácidos, y en ambas hay un enlace disulfuro entre dos cisteínas, esencial para la actividad de FNA. La hormona activa circulante se escinde a partir de un polipéptido precursor mucho mayor, de 152 aminoácidos en la rata y 151 aminoácidos en el hombre.

En los tres años siguientes se hizo pública la primera prueba directa de localización e identificación bioquímica del FNA. Se encontró que en la aurícula derecha de las ratas había de dos a dos veces y media más gránulos que en la izquierda. Los gránulos se concentraban apretadamente cerca de la superficie del corazón y en las regiones exteriores de las aurículas. No se han encontrado en los ventrículos de ratas ni de otros mamíferos, y la inyección de extractos ventriculares de mamífero no ejerce efecto alguno sobre los vasos sanguíneos, la diuresis ni la natriuresis. Por el contrario, se han descubierto gránulos en los ventrículos y las aurículas de especies no mamíferas, y se ha demostrado su relación con efectos diuréticos y natriuréticos. La presencia de gránulos en los ventrículos de especies no mamíferas y su ausencia en los mamíferos resulta coherente con el hecho de que las células cardiacas tiendan a estar más especializadas en las especies superiores.

Una vez determinada la localización del FNA, nuestro grupo aisló y purificó el péptido en junio de 1983; dos meses más tarde lo sintetizaron Ruth F. Nutt y sus colegas, de los laboratorios de investigación Merck Sharp & Dohme. El FNA constituye la parte activa de una molécula precursora mayor. Cuando diversos grupos determinaron la secuencia de aminoácidos del polipéptido, todos encontraron en el FNA un mismo núcleo de 21 aminoácidos. La hormona activa circulante de la rata tiene 28 aminoácidos y un peso molecular de 3060. La hormona activa se encuentra unida a un péptido inactivo de 100 aminoácidos y a un péptido de señalización de 24, que se adhiere cuando se sintetiza la molécula. No se ha determinado aún la forma circulante en el hombre, aunque es fuerte la sospecha de que también consta de 28 aminoácidos.

Se ha clonado y secuenciado recientemente el gen FNA humano, lo que habrá de permitir la síntesis de la hormona por medios químicos o insertando el gen en levaduras o bacterias. Por cualquiera de esos métodos puede elaborarse hormona en cantidad suficiente para estudiar su actividad en todo el organismo. Además, se han desarrollado anticuerpos anti-hormona, abriéndose con ello la posibilidad de realizar ensayos inmunológicos para valorar la liberación de FNA e identificar los lugares donde es activo.

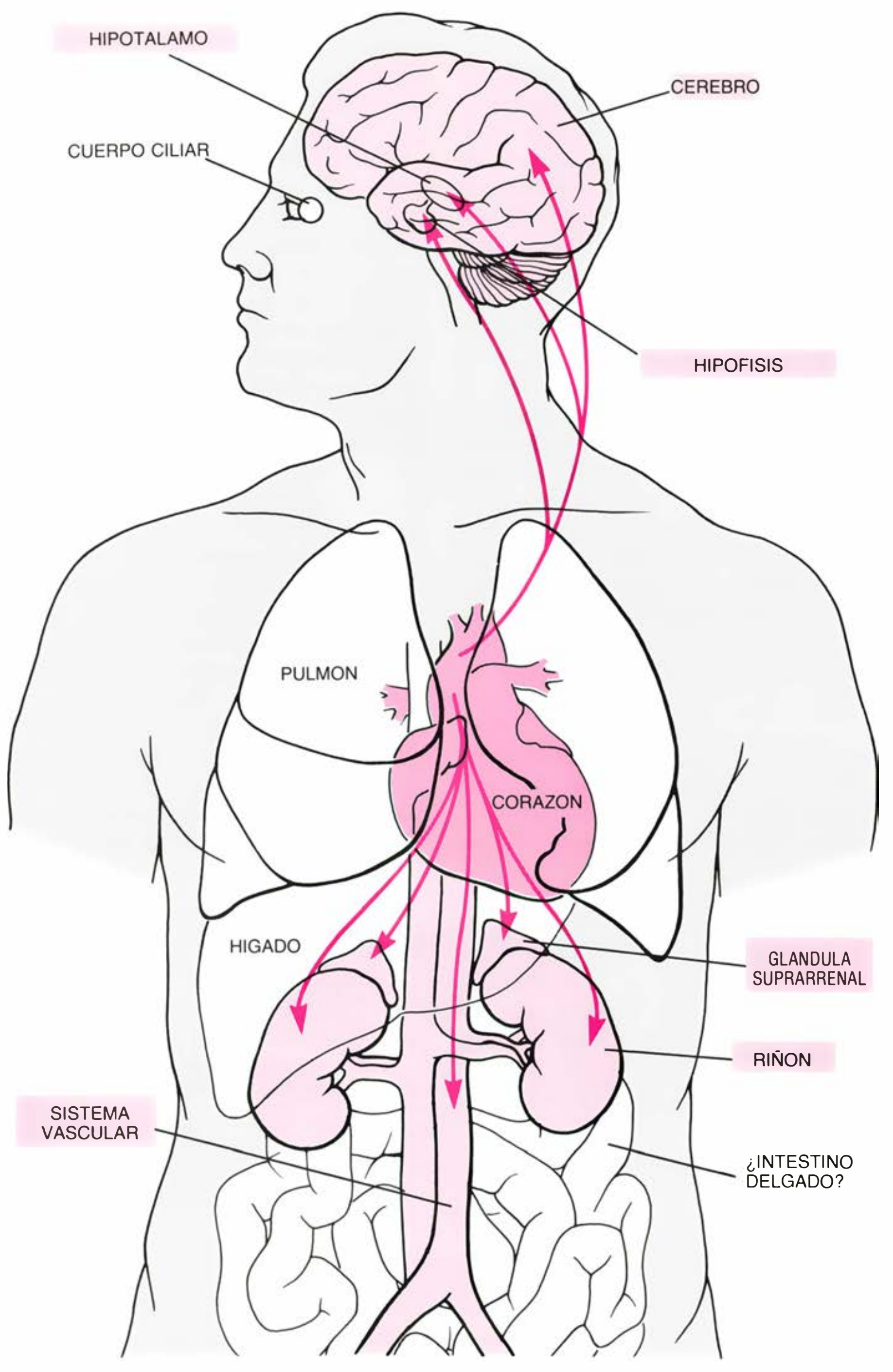
Cuando se inmovilizan las ratas hasta

crearles tensión, el nivel sanguíneo de FNA aumenta de cinco a veinte veces. También se ha medido la liberación cardiaca de FNA en pacientes humanos, afectos de enfermedad valvular y aumento de volumen sanguíneo, que estaban sometidos a cateterismo cardiaco, un procedimiento que permite obtener muestras de sangre de las arterias y las cámaras cardiacas. El nivel plasmático de FNA era de dos a ocho veces superior en la sangre venosa del seno coronario, que drena las aurículas, que en la sangre arterial o de venas periféricas. Ello confirma que el FNA lo liberan principalmente, si no exclusivamente, las células auriculares. Tanto en las ratas sometidas a tensión como en los pacientes cateterizados, los cardiocitos auriculares se encontraban dilatados, dilatación que constituía la señal para la liberación de FNA. El aumento del volumen de la sangre puede asimismo instar a los cardiocitos auriculares a dilatarse y liberar FNA, como se demostró al aumentar experimentalmente el volumen sanguíneo de ratas mediante infusión de una solución salina.

Tras la respuesta de los cardiocitos a la dilatación, en la que liberan FNA, el péptido viaja a través de las arterias hacia sus puntos efectores, los riñones, las glándulas suprarrenales, el cerebro y otros tejidos. En general, el FNA modifica la actividad de un complicado circuito homeostático de retroalimentación que regula la presión sanguínea, el volumen sanguíneo y la retención de sodio: el sistema renina-angiotensina, que enlaza distintas funciones del cerebro, corazón, arterias, glándulas suprarrenales, riñones y otros órganos. Una de las sustancias fundamentales del sistema es la enzima renina. La secretan células de las arterias que conducen a los glomérulos, estructuras saculares situadas en la entrada del riñón. Estas células yuxtaglomerulares secretan renina al torrente sanguíneo cuando el nivel de sodio en los túbulos distales del riñón es escaso o cuando la presión local del riñón es baja.

La renina circulante escinde un polipéptido llamado angiotensinógeno, obteniéndose angiotensina I, que a su vez se convierte en angiotensina II. Este pequeño péptido constituye un poderoso constrictor del músculo liso vascular. La angiotensina II ejerce también un efecto de retroalimentación, suprimiendo parcialmente la secreción de la renina por las células yuxtaglomerulares. Finalmente, estimula la glándula suprarrenal a segregar la hormona aldosterona, que viaja al riñón y la hipófisis posterior e inhibe la excreción de sodio y agua.

El FNA afecta al sistema renina-angiotensina inhibiendo, no se sabe cómo, la secreción de renina, y bloqueando directamente la secreción adrenal de aldosterona. Se aclaró en nuestro laboratorio la relación entre FNA y aldosterona mediante una serie de experimentos con cultivos de células adrenales bovinas y de rata. El FNA in-



4. SE SABE QUE EL FNA AFECTA distintas regiones del cerebro (entre ellas el hipotálamo), la hipófisis posterior, la glándula suprarrenal, el riñón y el sistema vascular. El FNA se une también a puntos efectores del pulmón, el hígado, el cuerpo ciliar (que segrega el humor acuoso del ojo) y probablemente el intestino delgado, si bien no están claros sus efectos sobre esos tejidos. En el cerebro el FNA se une a diversas zonas involucradas en el control de la presión sanguínea y la regulación de sodio y agua; en el hipotálamo inhibe la liberación de vasopresina, que se almacena en la hipófisis posterior y posee efectos antidiuréticos y constrictor de arteriolas y capilares. El FNA relaja las células musculares lisas de los vasos sanguíneos, inhibe la secreción de aldosterona (que tiende a elevar la presión sanguínea) por parte de la glándula suprarrenal y estimula, en el riñón, el aumento de la excreción de sodio y agua a partir del filtrado glomerular. Además, el FNA parece disminuir la reabsorción de sodio en los túbulos distales y tubos colectores del riñón.

hibía la producción normal de aldosterona adrenal sobre un 20 por ciento; reducía entre un 40 y un 70 por ciento el incremento de producción que suele seguir a la estimulación de las células suprarrenales con angiotensina II o la hormona hipofisaria ACTH. Se han advertido descensos significativos similares en los niveles plasmáticos de aldosterona en ratas y perros tras la inyección de FNA.

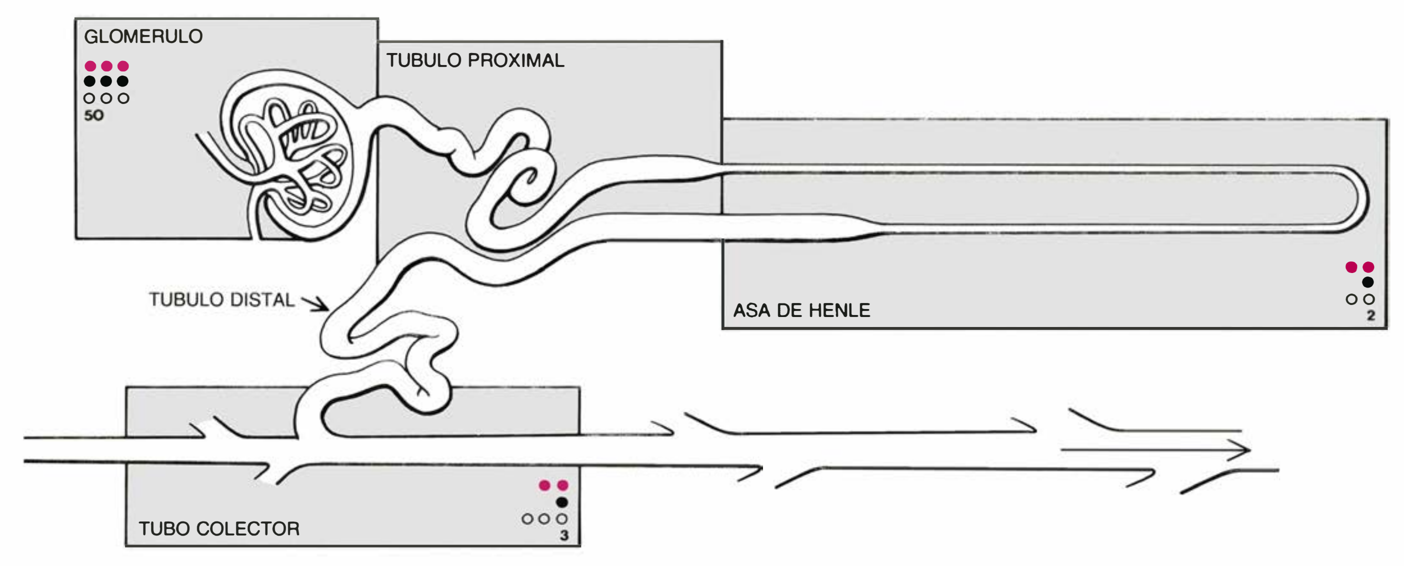
Para determinar si la disminución de los niveles de aldosterona respondía a la existencia de sitios específicos de unión para el FNA en la superficie de las células suprarrenales, introdujimos FNA marcado radiactivamente en cultivos de esas células y posteriormente añadimos FNA "frío", sin marcar. Observamos que la concentración del FNA marcado disminuía significativamente tras la introducción del FNA frío, signo de que éste desplazaba el péptido marcado en muchos lugares de la superficie de las células. Mediante la introducción de ACTH, antiogensina II y otros péptidos activos determinamos que el FNA se unía a lugares muy específicos de la célula. Puesto que esos péptidos no ejercían el mismo efecto de desplazamiento que el FNA frío cabía deducir la existencia de lugares de unión específicos para el FNA.

Además de los efectos del FNA sobre el sistema renina-angiotensina, el péptido actúa directamente en distintos lugares del riñón para regular la excreción de agua y sodio. Por medio de muestras marcadas radiactivamente, inyectadas en aorta de rata, se revela que el FNA se une a células epiteliales de los glomérulos y a numerosos receptores de vasos sanguíneos vecinos a los glomérulos y túbulos. La hormona muestra un efecto a corto plazo sobre el mecanismo por el cual los glomérulos filtran la sangre. El FNA probablemente haga más permeable el revestimiento de los glomérulos, permitiendo filtrar mayores cantidades de agua y sodio a partir de la sangre.

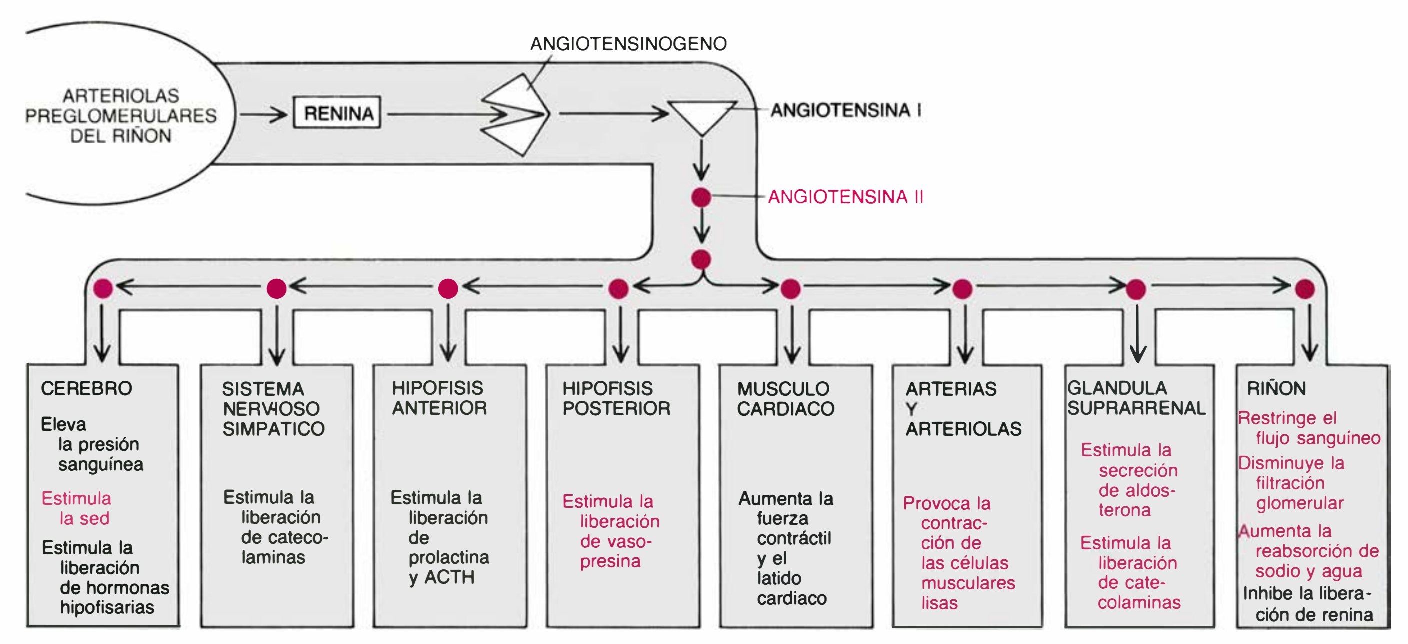
El FNA también actúa directamente sobre los túbulos renales, donde se forma orina a partir del filtrado transportado desde el glomérulo. Los túbulos distales "reabsorben" sodio del filtrado y lo devuelven a la corriente sanguínea; el FNA probablemente reduzca esa actividad. El mecanismo que subyace a tal efecto del FNA sobre los túbulos sigue constituyendo un misterio, pues no hay pruebas de que se requiera energía: la actividad del FNA no precisa consumo de oxígeno ni degradación de glucosa, a diferencia de otros mecanismos de reabsorción.

El papel del FNA como relajante de las células musculares de todo el sistema vascular no es menos importante que sus funciones sobre los glomérulos y túbulos renales. Aunque se ha demostrado que las inyecciones de FNA relajan y dilatan las grandes arterias vertebrales, femorales, carótidas y coronarias, el efecto del péptido es mucho mayor sobre las pequeñas arterias del riñón. Al añadir FNA sintético a baños de tiras arteriales de riñón de rata y conejo, la actividad constrictora de la angiotensina II y la hormona noradrenalina sobre el tejido vascular se inhibe profundamente durante 30 u 80 minutos. La infusión de FNA en un riñón de rata aislado provocó una rápida caída de la presión de perfusión, que duró 18 minutos. Significaban esos hallazgos que el FNA debía actuar sobre las células musculares lisas de los vasos sanguíneos o bien sobre el endotelio, el revestimiento celular de los vasos. Al añadir el péptido a vasos sanguíneos tras destruir su endotelio, persistió el efecto vasorrelajante, indicio de que el FNA actuaba sobre las células musculares lisas.

Se ignora el efecto preciso del FNA sobre esas células. Estamos realizando experimentos que someten a prueba nuestra hipótesis, según la cual la nueva hormona afecta a la entrada de calcio en las células o bien a su localización en las mismas. Podría realizar esa acción indirectamente, activando el monofosfato cíclico de guanosina (GMP), nucleótido que actúa como segundo mensajero (una sustancia que transmite al interior de la célula el mensaje liberado por una hormona en la superficie celular). La relación entre el FNA y el GMP cíclico quedó demostrada con el hallazgo de que, en las ratas, la inyección del péptido provoca aumentos significativos de GMP cíclicos en plasma y orina. El FNA



5. EN EL RIÑON, EL FNA parece ser más activo en los glomérulos que en otras regiones funcionales, como indica este diagrama esquemático. El FNA ejerce sus funciones uniéndose a una célula efectora, donde suele activar la guanilato ciclasa, enzima localizada en la membrana celular. Esta activa el nucleótido monofosfato cíclico de guanosina (GMP cíclico), un segundo mensajero que lleva el mensaje del FNA al interior de la célula. El FNA inhibe también la estimulación de la adenilato-ciclasa, implicada en otro sistema de segundos mensajeros. Los estudios realizados con FNA marcado radiactivamente muestran una alta densidad de enlaces (*círculos de color*) en los glomérulos de ratas. Sobre la misma escala, de 0 a 3, otros ensayos detectan en los glomérulos una marcada actividad de la guanilato ciclasa (*círculos negros*) e inhibición de la adenilato ciclasa (*círculos blancos*); el nivel de GMP cíclico (*cifras*) aumenta más de 50 veces sobre el nivel basal. Los tubos colectores y la porción gruesa de las asas de Henle muestran cierta actividad de FNA, pero no así los túbulos proximales del riñón.



6. INHIBE EL FNA ciertas acciones de la angiotensina II, hormona peptídica que eleva la presión de la sangre y aumenta el volumen de ésta, entre otros efectos. Cuando la presión sanguínea renal es baja, el riñón secreta la enzima renina al torrente sanguíneo. La renina escinde un polipéptido precursor, el angiotensinógeno, obteniéndose angiotensina I. Esta, a su vez, se convierte en el péptido angiotensina II, que la corriente sanguínea transporta hacia los órganos que aquí se indica. La angiotensina II ejerce su efecto hipertensor provocando directamente la contracción de los vasos sanguíneos, estimulando la secreción de otras hormonas constrictoras (como la vasopresina, la adrenalina y otras catecolaminas), así como estimulando la liberación de aldosterona por parte de la glándula suprarrenal, que favorece en el riñón la retención de sal y agua. La angiotensina II ejerce también un efecto de retroalimentación, inhibiendo la liberación de renina por parte del riñón. Se muestran en color las acciones inhibidas por el FNA. (Los dibujos son de Andrew Christie y Kevin A. Samerville.)

quizá logre ese efecto activando la enzima guanilato-ciclasa, que se encuentra unida a la membrana celular y participa en la activación del GMP cíclico. El FNA inhibe también la estimulación de la adenilato-ciclasa, enzima implicada en la actividad de los segundos mensajeros de algunas células.

Los experimentos ralizados con FNA sintético marcado radiactivamente han demostrado que el péptido actúa en múltiples lugares del cerebro de ratas y coballas uniéndose a zonas implicadas en la regulación de la presión sanguínea y el control de los niveles de sodio, potasio y agua. El FNA inhibe también la producción de vasopresina, una hormona sintetizada en el hipotálamo, en la base del cerebro, y almacenada en la hipófisis posterior. La vasopresina liberada por la hipófisis constriñe los vasos sanguíneos, eleva la presión arterial e influye en la reabsorción de agua por los túbulos renales. Finalmente, se ha demostrado que el FNA se une en diversos puntos al cuerpo ciliar del ojo, probablemente contribuyendo al control de la presión ocular.

Mientras continúa la investigación sobre la fisiología de los efectos del FNA, varios grupos estudian cómo podría utilizarse FNA en el control de la hipertensión y la insuficiencia cardiaca congestiva. En nuestro laboratorio hemos observado una reducción significativa de la presión arterial a corto plazo (menos de una hora) tras la administración única de un microgramo de FNA sintético a ratas hipertensas. La mayor reducción se da en animales cuya hipertensión depende de la actividad de la renina. Al administrarse una infusión de FNA durante varios días, a razón de un microgramo por hora, la presión arterial descendió significativamente: a niveles normales tras el segundo día. Un tratamiento similar, con dosis menores, administrado durante 12 días, provocó una caída de la presión arterial durante los últimos 10 días, y una disminución de los niveles plasmáticos y urinarios de aldosterona.

En estudios posteriores hemos medido los niveles de FNA en una estirpe de ratas genéticamente predispuestas a la hipertensión. Encontramos un nivel alto de FNA en la corriente sanguínea y un nivel inferior al normal en la aurícula izquierda (pero no en la derecha). Parece que el alto nivel circulante refleja un intento por parte del organismo de disminuir la presión arterial; el nivel de la aurícula izquierda, inferior, sugiere que ésta agota su FNA en la hipertensión.

El FNA parece también desempeñar un papel importante en la insuficiencia cardiaca congestiva. En ese estado el corazón no logra ejercer adecuadamente su función de bombeo, provocando en el paciente ahogo y marcados edemas en las piernas. Aunque se desconoce cómo contribuye el FNA a la enfermedad, nuestros estudios con hámsters afectos de insuficiencia congestiva espontánea han puesto de manifiesto una correlación entre las variaciones de los niveles de FNA y el progreso de la enfermedad.

En esos hámsters la presión arterial es siempre anormalmente baja; la presión venosa aumenta con la gravedad de la enfermedad. En todos los estadios, la cantidad de FNA en las aurículas es menor que en los animales del grupo control. El hallazgo más sorprendente es un aumento significativo de FNA circulante, que aparece tan pronto como la presión venosa comienza a aumentar. El nivel de FNA circulante alcanza un máximo cuando la enfermedad está moderadamente avanzada y disminuye en las fases finales. Los estudios postmortem de las aurículas enfermas revelan lo que llamamos hiperplasia de agotamiento: un aumento del retículo endoplasmático rugoso, el lugar de la síntesis del péptido; un aumento del tamaño del aparato de Golgi, donde maduran los péptidos, y una disminución del número de gránulos secretores, cada uno de los cuales alberga menos FNA.

Sugieren esos resultados que basta una pequeña elevación de la presión auricular para desencadenar la hipersecreción de FNA. El menor nivel de

FNA en las aurículas sugiere su agotamiento. Creemos que la retención de sodio y la activación del sistema renina-angiotensina-aldosterona, dos indicadores de insuficiencia cardiaca congestiva, se posponen hasta las últimas fases de la enfermedad mediante la liberación de grandes cantidades de FNA. La aparición final de esos efectos quizá responda a una "regulación a la baja": en presencia de excesivas cantidades de FNA, las células efectoras reducirían su número de puntos de unión del FNA a la membrana externa, frenándose las reacciones celulares normalmente desencadenadas por la unión del FNA.

El estudio del FNA debe ahora dirigirse al desarrollo de nuevos tratamientos para la hipertensión y otras alteraciones de la presión sanguínea, las alteraciones del volumen sanguíneo y las enfermedades renales que afectan a la excreción de sales y agua. Queda aún mucho por investigar antes de que puedan administrarse formas sintéticas del péptido en la práctica clínica. Debe dilucidarse la fisiología de los efectos del FNA sobre los túbulos renales, así como la relación existente entre la relajación de los vasos sanguíneos, los movimientos del calcio en las células musculares lisas y los efectos sobre las adenilato y guanilato ciclasas. Hay que investigar también los factores que activan la liberación de FNA por los cardiocitos y determinar en detalle cómo actúa el péptido en distintas regiones del cerebro. Afortunadamente, ensayos clínicos recientes han confirmado que todos los efectos del FNA demostrados en animales se dan también en el hombre; tales hallazgos acortarán el camino hacia el desarrollo de tratamientos para la enfermedad.

La consecución de una terapia con FNA dependerá del conocimiento más adecuado de su actividad fisiológica y del desarrollo de técnicas de elaboración de diversos análogos de FNA, utilizables como drogas para tratar cada enfermedad en lugares de unión específicos. Los investigadores deberán desarrollar vías de modificación de las drogas, de modo que queden protegidas frente a enzimas y ácidos gástricos y resulten fácilmente absorbibles tras su administración oral. La biotecnología y la síntesis química proporcionarán las técnicas necesarias para esos cometidos, pero, probablemente, pasarán varios años antes de que los primeros análogos de FNA estén listos para una experimentación controlada en seres humanos.

Filogenia de las aves mediante comparación de ADN

Las diferencias entre los ADN descubren las distancias evolutivas y permiten reconstruir y datar las ramificaciones de los linajes, al tiempo que constituyen un criterio para clasificar los grupos

Charles G. Sibley y Jon E. Ahlquist

Todos los organismos tienen antepasados. Vale decir: todos los organismos tienen su propia historia evolutiva. Como todas las plantas y animales evolucionaron –cabe presumir– a partir de un origen único, comparten una sola filogenia o historia. La reconstrucción de dicha filogenia es el objetivo principal de la biología evolutiva. Las especies actuales son los brotes postreros de un vasto árbol filogenético cuyas ramas mayores y tronco se escapan a la visión directa. Para reconstruir el árbol de la vida es preciso determinar la pauta de la ramificación y, a ser posible, datar las divergencias del pasado.

Durante los diez últimos años, hemos empleado una técnica que extrae información filogenética del material genético, el ADN. Este método, la hibridación ADN-ADN, nos ha permitido reconstruir el modelo de ramificación de los principales linajes de aves. Las aproximadamente 9000 especies existentes descienden de linajes que empezaron a diferenciarse uno del otro hace unos 150 millones de años, a finales del Jurásico y comienzos del Cretácico, después de que se originara ese grupo vertebrado a partir de un ancestro reptiliano. Pierce Brodkorb, de la Universidad de Florida, ha calculado que han existido unas 150.000 especies de aves. Las vivas son sólo el 6 por ciento del total, el resto está extinto.

Nuestro planteamiento ha sido medir la diferencia media entre los ADN de especies que representan a los principales grupos de aves vivientes, y ordenar los resultados para reconstruir la secuencia de las ramificaciones del árbol aviario. La filogenia así rehecha provee el fundamento para una clasificación de las aves en la que las especies vivientes están asignadas a categorías taxonómicas en virtud de sus relaciones genealógicas. En algunos casos, nuestros resultados se apartan de las clasificaciones de las aves al uso.

Los elementos de la filogenia componen el esquema de la ramificación y señalan la fecha de cada divergencia. Se produce una ramificación cuando una barrera, por lo general geográfica, divide una especie única en dos poblaciones que luego se separan genéticamente y se convierten en los antecesores de dos linajes. Cada linaje se puede escindir a su vez, y el proceso repetirse para producir una radiación de especies de variada ecología y morfología.

Hasta hace poco, la comparación de caracteres anatómicos de especies vivientes era la única fuente de información sobre el esquema de las ramificaciones. Este método ha dado respuesta a muchos interrogantes y ha perfilado el esbozo de la historia de la vida. Ahora bien, los caracteres anatómicos están modelados por imperativos funcionales; así pues, la estructura puede ofrecer pistas falsas sobre la filogenia, porque la evolución convergente puede producir estructuras similares en organismos no emparentados. Los vencejos y las golondrinas, por ejemplo, se parecen superficialmente porque ambos grupos están especializados en alimentarse de insectos en vuelo. En las primeras clasificaciones de aves, los dos grupos aparecían juntos. Estudios posteriores pusieron de manifiesto diferencias fundamentales de anatomía y, con el tiempo, se hizo evidente que no existía relación estrecha entre ellos: los vencejos son parientes lejanos de los colibríes, y las golondrinas están emparentadas con otras aves canoras. Muchos casos de convergencia, muy sutiles, ponen en cuestión una solución por medio de comparaciones anatómicas.

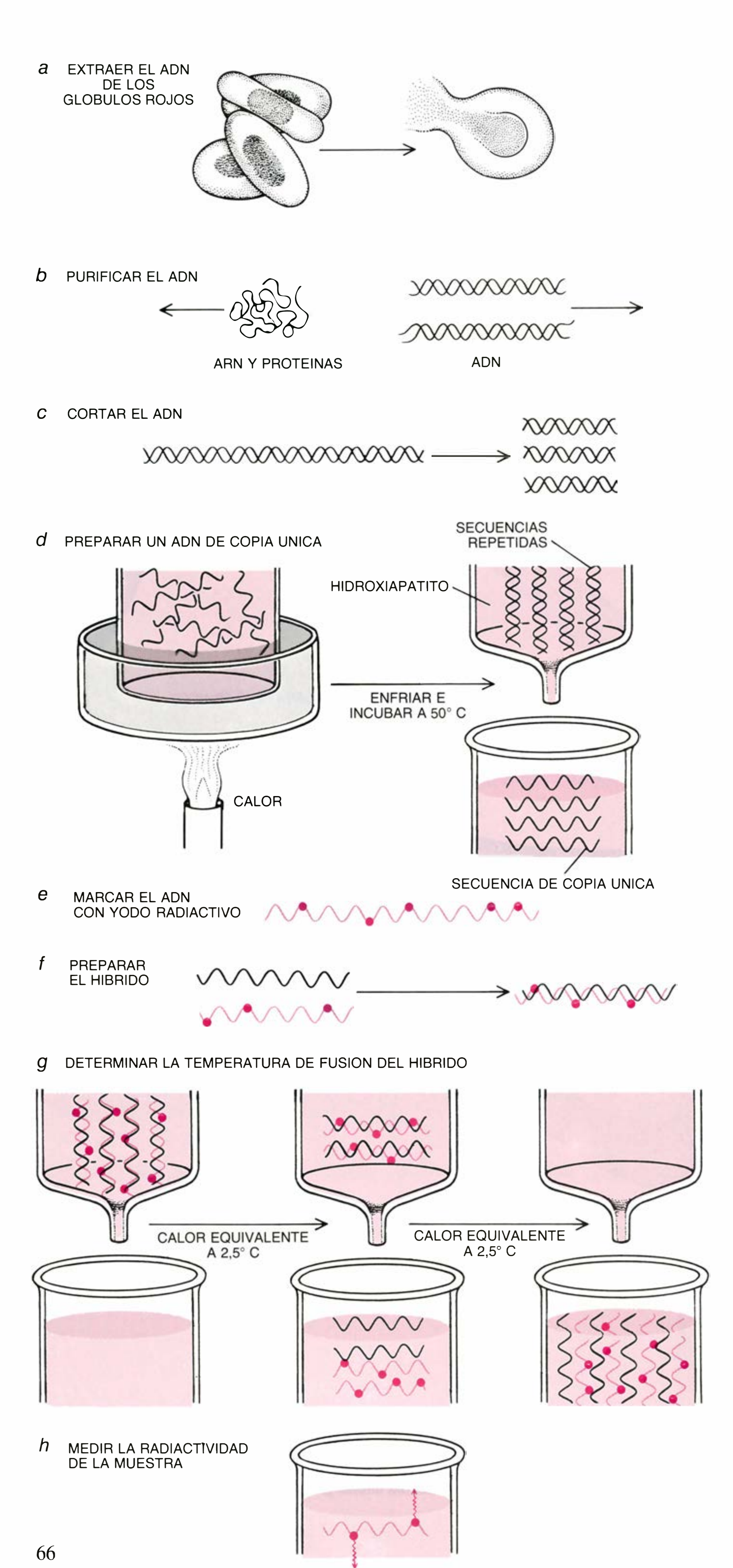
Para determinar la fecha de la ramificación inferida de la comparación anatómica, se hizo necesario confiar en el registro fósil. Se han reconstruido filogenias parciales para algunos grupos a partir de datos fósiles, pero dicho registro, para ciertos grupos, aves incluidas, es fragmentario. Además, aunque un fósil datado indica, de forma aproximada, cuándo pereció el organismo individual, el momento en que su linaje divergió del de sus parientes resta por lo general dudoso.

Claro está, un método directo para medir las distancias genealógicas entre los linajes existentes y datar las divergencias entre ellos mejoraría la reconstrucción de las filogenias. Las relaciones genéticas entre especies vivientes reflejan su historia evolutiva; como el cambio genético es sobre todo divergente, la diferencia genética entre cualesquiera dos linajes está relacionada con el tiempo transcurrido desde que ambos compartieron por última vez un ancestro común. Por tanto, para reconstruir la filogenia de las aves, estudiaremos su material genético.

En todos los organismos, exceptuando ciertos virus, el ADN es el material genético. Se trata de una molécula de doble filamento, en la que cada uno de ellos es una secuencia de cuatro unidades químicas, los nucleótidos. Estos difieren entre sí sólo por sus bases: adenina (*A*), timina (*T*), citosina (*C*) y guanina (*G*). A lo largo de los dos filamentos, las bases forman parejas complementarias que permanecen unidas mediante puentes de hidrógeno: la *A* se empareja con *T*, y la *C* con *G*. La información genética está cifrada en la secuencia de bases. Secuen-



1. ESPECIES DE BARBUDOS Y TUCANES posadas en una rama que simboliza el parentesco genealógico de los grupos a los que pertenecen. Tradicionalmente se ha colocado a los barbudos del Nuevo Mundo, Africa y Asia en una famillia y a los tucanes en otra. Las comparaciones de entre las cadenas de ácido desoxirribonucleico mostraban que, no obstante la apariencia de las aves, los barbudos del Nuevo Mundo poseen vínculos más estrechos con los tucanes que con los barbudos del Viejo Mundo. El grado de diferencia entre ADN correspondientes indicaba que los barbudos de Africa compartieron, por última vez, un ancestro con los barbudos del Nuevo Mundo y los tucanes hace unos 55 millones de años; estos dos últimos grupos se separaron hace 30 millones de años.



cias específicas de éstas forman los genes, que codifican las innumerables proteínas que erigen la mayor parte de las estructuras de las plantas y los animales, amén de controlar sus funciones.

En el genoma, o dotación de genes completa de una célula, la mayoría están representados por una sola copia. Entre un 3 y un 5 por ciento de las distintas secuencias de los organismos superiores presentan más de una copia en cada genoma. Esas secuencias repetidas pueden suponer alrededor del 40 por ciento del volumen total de ADN en una célula.

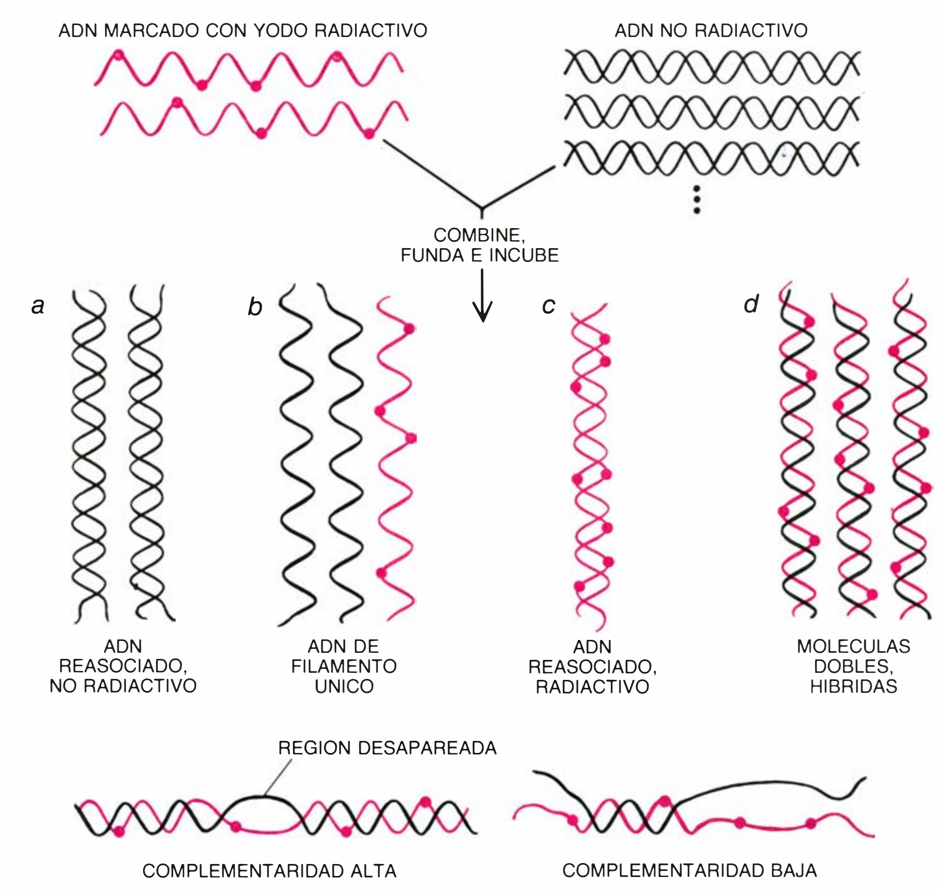
Hay casi dos mil millones de pares de nucleótidos en el genoma de un ave. La técnica de hibridación ADN-ADN nos permite comparar ese inmenso raudal de unidades y medir las diferencias genéticas entre las especies vivientes. A partir de esas medidas, podemos reconstruir el esquema de la ramificación filogenética y, mediante una calibración en función del tiempo de las diferencias genéticas medidas, determinar las fechas aproximadas de diferenciación de los distintos linajes vivientes.

La técnica de la hibridación se funda en las propiedades del ADN. Cuando una disolución que contiene ADN de doble filamento se calienta hasta la ebullición, los puentes de hidrógeno entre bases complementarias se "funden", o rompen, y el ADN se desdobla en sus filamentos. Los puentes de hidrógeno son los enlaces más débiles de ADN; el resto de la molécula no sufre

2. HIBRIDACION ADN-ADN. Precisa una fuente celular de ADN. Para estudios sobre aves, se extrae el ADN de los glóbulos rojos (que en las aves tienen núcleo) mediante ruptura de los mismos (*a*). Se separa el ADN del ARN y las proteínas (*b*); se cortan los largos filamentos en trozos menores (*c*). Se hierve luego brevemente el ADN para que las moléculas de doble filamento se disocien en filamentos sencillos. Mientras el ADN se enfría, las secuencias que se presentan en un gran número de copias se reasocian más deprisa que las presentes como copias únicas. Se pasa el ADN reasociado por una columna de hidroxiapatito, que retiene el ADN de doble filamento, pero no el de filamento sencillo (*d*). La mayoría de las secuencias repetidas, con dos filamentos, quedan fijadas en el hidroxiapatito; los fragmentos de ADN que contienen copias únicas de cada gen pasan a su través. Este ADN de copia única se marca con yodo radiactivo (*e*) y se mezcla con ADN sin marcar de la misma especie o de otra. Los ADN mezclados se incuban a 60 grados C durante 120 horas, con lo que resulta un ADN híbrido que contiene un filamento marcado y otro sin marcar (*f*). Cada híbrido de ADN se coloca en una columna de hidroxiapatito, que se calienta en un baño de agua desde 55 grados C hasta 95 grados C, a incrementos de 2,5 grados. A cada incremento, los filamentos sencillos liberados por la fusión de los híbridos se recogen en un vial (*g*). La medición de la radiactividad de los viales indica cuánto híbrido se funde a cada temperatura (*h*).

daños con la ebullición. Mientras la muestra fundida se enfría, los filamentos colisionan al azar. Si los que chocan tienen secuencias de bases complementarias, se reasociarán o recombinarán en una estructura de doble filamento: las bases complementarias se "reconocen" y se restablecen los puentes de hidrógeno. Si la recombinación se efectúa a baja temperatura, el *dúplex* restaurado, o ADN de doble filamento, puede albergar numerosos errores de emparejamiento. Ahora bien, a una temperatura de 60 grados C, se habrán de emparejar adecuadamente cerca del 80 por ciento de las bases para que el dúplex sea estable. En tales condiciones los filamentos singulares de ADN se recombinan sólo con sus complementarios, y el ADN original de doble filamento se recompone.

Cuando ADN de filamento sencillo, procedente de dos especies distintas, se combina e incuba a 60 grados C, se formará ADN híbrido de doble filamento sólo entre las secuencias de bases homólogas: secuencias heredadas de un ancestro común de las dos especies. Sólo las secuencias homólogas contienen parejas complementarias suficientes para formar dobles filamentos térmicamente estables a 60 grados C. Un dúplex híbrido de ADN de diferentes especies contendrá bases mal emparejadas, porque los dos linajes han incorporado conjuntos distintos de mutaciones desde que compartieron un ancestro por última vez. Así, una *A* puede colocarse ante una *C* o una *G* frente a una *T*, y no se formará ningún enlace entre las bases. Como la temperatura de fusión del dúplex es proporcional al número de puentes de hidrógeno entre los dos filamentos, esas discordancias harán que el ADN híbrido funda a una temperatura inferior a la requerida para fundir dobles filamentos perfectamente emparejados.



3. SE FORMAN HIBRIDOS a partir de una pequeña cantidad de ADN marcado radiactivamente y mil veces más ADN no marcado de la misma especie o de otra distinta (*arriba*). Una parte importante de ADN para separarlo en filamentos sencillos, que se incuban para permitir que se reasocien. Mucho ADN no marcado se reasocia con filamentos complementarios, no marcados (*a*); como estos productos no son radiactivos, tampoco influyen en las posteriores mediciones. Algunas fibras sencillas no se reasocian (*b*), y sólo un 1 por ciento de los filamentos marcados radiactivamente se hibridan con otros filamentos marcados (*c*). Parte del ADN forma moléculas dobles, híbridas, constituidas por un filamento marcado y otro sin marcar (*d*). En los híbridos de ADN de dos especies, la proporción de bases de nucleótido, a lo largo de un filamento, que se aparean con compañeras complementarias del filamento adyacente depende de la similitud genética de las especies. Como en los híbridos bien emparejados (*abajo, a la izquierda*) el número de enlaces que unen los filamentos es mayor, funden a temperatura más alta que los mal emparejados (*abajo, a la derecha*).

En el procedimiento de hibridación ADN-ADN, se extrae el ADN de los núcleos de las células y se aísla de las proteínas y demás componentes celulares. Los largos filamentos se cortarán en trozos que promedien 500 nucleótidos de longitud. Se extrae del ADN de la especie a comparar la mayoría de las secuencias génicas repetidas; la "copia única" de ADN que queda se marca con yodo radiactivo. Una pequeña cantidad de ADN radiactivo (conocido como señalizador) se combina con una cantidad mucho mayor de ADN no marcado (el conductor) de la misma especie. El mismo señalizador se combina también con el ADN conductor de otra especie. Cada mezcla producirá un híbrido distinto: un *homodúplex*, en el que la especie del señalizador y del conductor son la misma, o un *heterodúplex*, en el que los dos filamentos pertenecen a especies distintas. La forma homodúplex proporciona un arquetipo en relación al cual se pueden comparar las propiedades de fusión de los heterodúplex.

Las mezclas señalizador-conductor se hierven durante cinco minutos para disociar las moléculas de doble filamento en sendos componentes sencillos. A fin de que los filamentos simples se recombinen en cadenas dobles, se incuban durante 120 horas a 60 grados C, en una disolución tampón de fosfato sódico. Los híbridos resultantes, de doble filamento, se colocan en una columna de hidroxiapatito, forma de fosfato de calcio que retiene el ADN de doble filamento, pero no el de filamento sencillo. Se sumerge la columna en un baño de agua a 55 grados C, y se eleva la temperatura de dicho baño a intervalos de 2,5 grados C hasta alcanzar los 95 grados C. En cada una de las diecisiete temperaturas se lava la columna, y el ADN de filamento sencillo producido por fusión de los dúplex se recoge en un vial. Se mide la radiactividad de cada vial, que indica cuánto híbrido se ha fundido. Los resultados se representan como una curva de fusión: una gráfica que muestra cuánto híbrido se ha fundido a cada temperatura. La diferencia media, en grados centígrados, entre la curva de los homodúplex y la de los heterodúplex cuantifica la diferencia genética media entre la especie del señalizador y cada una de las especies conductoras que se compararon con aquélla.

La diferencia entre los ADN de dos especies puede servir de indicador de la distancia genealógica entre ellas, si y

sólo si se puede dar por sentado que el ADN cambia a una velocidad media que es la misma en todos los linajes. Emile Zuckerkandl y Linus Pauling, a la sazón en el Instituto de Tecnología de California, propusieron en 1962 que las proteínas evolucionaban a velocidad constante; desde entonces mucho se ha discutido y debatido acerca de los "relojes moleculares".

Hemos descubierto que el reloj del ADN parece llevar el mismo compás medio en todos los linajes de aves. Los datos provienen de una técnica conocida como prueba de la velocidad relativa, propuesta en 1967 por Vincent M. Sarich y Allan C. Wilson, de la Universidad de California en Berkeley. La prueba de la velocidad relativa compara tres especies cualesquiera de las que se sabe que dos están más estrechamente emparentadas entre sí que con la tercera. Si escogemos un trío así de especies de aves y comparamos el ADN señalizador de la especie remota con el ADN conductor de cada una de las otras dos especies, encontraremos que las distancias genéticas entre la más lejana y cada una de las otras dos (medida por la temperatura de fusión de los respectivos híbridos de ADN) son siempre iguales dentro de los límites del error experimental. Ya que una misma longitud de historia evolutiva separa a ambas especies conductoras del último ancestro compartido con la especie señalizadora, el ADN de las dos especies conductoras tiene que haber cambiado a la misma velocidad media. Nuestra filogenia de las aves vivientes incluye miles de estos tríos de especies, que rinden todos el mismo resultado y confirman la velocidad media uniforme del reloj de ADN en las aves.

Esta constancia manifiesta puede parecer mágica (o un desatino) a primera vista, pero puede ser simplemente el resultado de medir diferencias entre secuencias de miles de millones de pares de bases tras millones de años de evolución. La selección natural dicta que los distintos genes evolucionen a velocidades diferentes; además, cualquier gen individual puede evolucionar a diversas velocidades en diferentes momentos. Ahora bien, el margen de velocidades es estrecho y el número de genes en el genoma de un ave es inmenso. Mientras la velocidad de evolución de un gen aumenta, es estadísticamente probable que la de otro disminuya en la misma magnitud. El equilibrio de las velocidades de cambio de los diferentes genes no tiene por qué producirse simultáneamente: la constancia aparente surge al cabo de millones de años. Cualquiera que sea la explicación correcta, el ADN aviario parece evolucionar a una velocidad media uniforme.

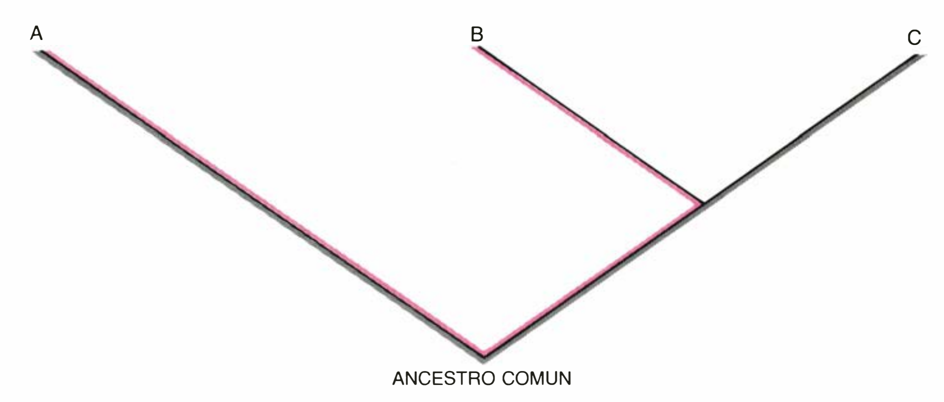
Como las bases no apareadas en los híbridos del ADN son el resultado de cambios genéticos que se han fijado en los dos linajes desde que compartieron por última vez un ancestro común, el número de desapareamientos es proporcional al tiempo que los linajes llevan divergiendo. Por consiguiente, la temperatura media de fusión de un híbrido de ADN es una medida indirecta del tiempo transcurrido desde que se produjo la ramificación. Mediante correlación de la temperatura media de fusión con el acontecimiento geológico datado que hizo que una especie ancestral se dividiera en linajes aislados, podemos calibrar el reloj de ADN en tiempo absoluto.

Damos así por sentado que el ancestro común del avestruz africano y el ñandú de Suramérica se extendía por el protocontinente de Gondwana antes de que la deriva continental desgajara los continentes australes de hoy y se abriera el océano Atlántico durante el Cretácico. Los datos geológicos indican que el Atlántico se convirtió en una barrera para los animales sin alas hace unos 80 millones de años. Así pues, los linajes del avestruz y del ñandú tienen que haberse separado más o menos por entonces. La división de los 80 millones de años por la diferencia entre la temperatura media de fusión de los heterodúplex de ADN avestruz/ñandú y la de los homodúplex avestruz/avestruz o ñandú/ñandú proporciona una constante de calibración en millones de años de divergencia por grado de descenso de la temperatura media de fusión.

Hemos datado siete divergencias entre linajes de aves, provocadas por tres acontecimientos geológicos: dos de ellos hace ochenta millones de años y un tercero alrededor de cuarenta. Todos los ejemplos proporcionan una constante de calibración entre 4,3 y 4,7 y una media de 4,5. Así pues, un descenso medio de un grado centígrado en la temperatura de fusión equivale a unos 4,5 millones de años desde que los dos linajes compartieron su ancestro más reciente. Esta constante es provisional y está sujeta a revisión, pero la empleamos para calcular fechas de divergencia aproximadas.

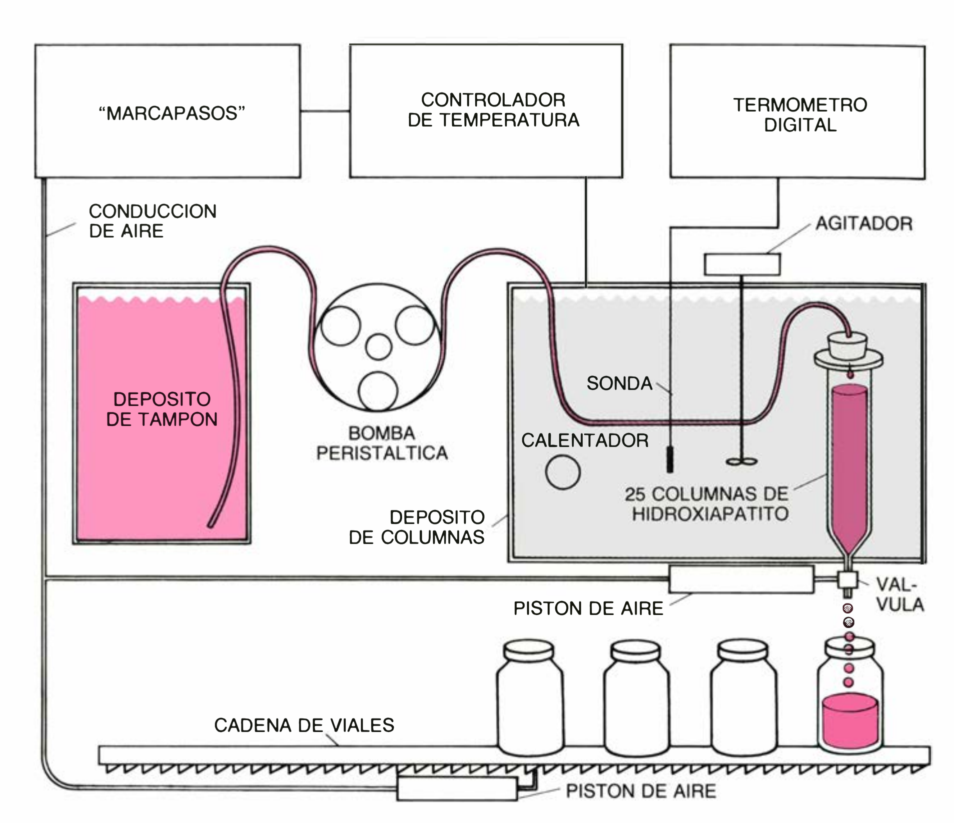
Durante los últimos diez años, hemos realizado más de 25.000 comparaciones de híbridos de ADN, empleando material genético de unas 1600 especies que, en conjunto, representan 168 de las 171 familias tradicionales de aves vivientes. A partir de estos datos hemos reconstruido la filogenia de la mayoría de los grupos. Los ejemplos que siguen ilustran algunos de los problemas que hemos estudiado, y las soluciones apuntadas por los datos de hibridación de ADN.

Los barbudos son aves pequeñas y, por lo general, de brillantes colores, con mechones de cerdas en la base de su pico, bastante largo. Los barbudos del Viejo Mundo viven en Africa y Asia meridional; las del Nuevo Mundo, en América central y del sur. Tradicionalmente, los barbudos han sido in-



4. CONFIRMA LA PRUEBA DE LA VELOCIDAD RELATIVA que el ADN evoluciona a la misma velocidad media en las distintas especies. El ensayo puede realizarse con un trío de especies en el que dos de ellas (*B* y *C*) están más estrechamente emparentadas entre sí que cualquiera de ellas con una tercera (*A*). Si el ADN de las dos especies asociadas se hibrida con el ADN de la especie lejana, la temperatura de fusión de los dos híbridos será idéntica, dentro del margen de error experimental, lo que indica que los ADN híbridos contienen igual número de bases desapareadas. De ese modo, las distancias genéticas entre las especies *A* y *B* (*color*) y *A* y *C* (*gris*) son idénticas. Ya que el mismo período de tiempo separa las especies *B* y *C* del último ancestro compartido con *A*, la velocidad media a que ha cambiado su ADN tiene que ser idéntica.

cluidos en la familia Capitonidae, y se creía que estaban emparentados con los picos (Picidae) y los tucanes frugívoros de pico grande (Ramphastidae), de los trópicos del Nuevo Mundo. Muchos taxónomos han subrayado que las especies pequeñas de tucanes y las grandes de barbudos del Nuevo Mundo presentan semejanzas morfológicas; y dos estudios recientes han hecho hincapié en el estrecho parentesco entre los barbudos y los tucanes. En 1984, Philip Burton, del Museo Británico de Historia Natural, concluía tras su estudio de la región de la cabeza: "parece razonable considerar los tucanes un grupo especializado de barbudos que surgió y se difundió por Suramérica". En términos aproximados se pronunciaba, en 1985, Lester L. Short, Jr., del Museo Americano de Historia Natural: "en efecto, los tucanes son barbudos grandes, especializados, con el pico dentado".



5. APARATO PARA EL ANALISIS DE HIBRIDOS DE ADN. El analizador de ADN procesa 25 híbridos simultáneamente. Un "marcapasos" sincroniza el funcionamiento del aparato; el controlador regula la temperatura del baño de agua en el que los ADN híbridos, contenidos en una fila de 25 columnas de hidroxiapatito, se encuentran sumergidos. Cuando el "marcapasos" libera un pulso de aire comprimido, la cadena de viales coloca uno debajo de las columnas y las válvulas del fondo de las mismas se abren, permitiendo que la disolución tampón suministrada por la bomba peristáltica fluya por las columnas. El tampón arrastra al vial el ADN de filamento sencillo producido por fusión del híbrido. Acto seguido, se cierran las válvulas y el calentador eleva a 2,5 grados la temperatura del agua en el depósito de las columnas, antes de que el "marcapasos" libere otro pulso y se inicie el ciclo siguiente. Una medición de la cantidad de ADN marcado radiactivamente en cada vial, realizada a posteriori, indica cuánto ADN híbrido ha fundido a cada temperatura.

Las comparaciones de ADN coinciden con Burton y Short, y nos permiten añadir la dimensión temporal a sus conclusiones. El ADN indica que la ramificación entre los barbudos del Viejo y del Nuevo Mundo tuvo lugar hace 55 millones de años. Los tucanes se separaron de los barbudos del Nuevo Mundo en fecha más reciente, hace unos 30 millones de años. Así, los tucanes son parientes más próximos de los barbudos del Nuevo Mundo de lo que lo son los dos grupos de barbudos entre sí. Para reflejar este parentesco, nuestra clasificación de estos y otros grupos pertenecientes al mismo orden es como sigue:

Orden Piciformes
- Parvorden Picida
  - Familia Picidae (picos)
  - Familia Indicatoridae (indicadores)
- Parvorden Ramphastida
  - Superfamilia Megalaimoidea
    - Familia Megalaimidae (barbudos del Viejo Mundo)
  - Superfamilia Ramphastoidea
    - Familia Ramphastidae
      - Subfamilia Ramphastinae (tucanes)
      - Subfamilia Capitoninae (barbudos del Nuevo Mundo)

Nuestra clasificación se basa en la pauta de ramificación de la filogenia y las fechas de origen de los distintos grupos, determinadas mediante comparación de ADN. Hemos dividido la escala del tiempo evolutivo en segmentos de 10 millones de años, y asignado una categoría taxonómica a cada segmento. Los órdenes, en nuestro esquema, son aquellos linajes que se separaron de otros linajes hace de 90 a 100 millones de años; los subórdenes se ramificaron 80 o 90 millones de años atrás. Los infraórdenes se originaron hace 70 a 80 millones de años; los parvórdenes, de 60 a 70; las superfamilias de 50 a 60; las familias de 40 a 50; las subfamilias de 30 a 40, y las tribus de 20 a 30 millones de años atrás. Una consecuencia de este procedimiento es que forma grupos, en el mismo nivel categórico, aproximadamente iguales en el grado de divergencia evolutiva. Las fronteras que hemos construido no son rígidas, sino que aportan el criterio para una clasificación que refleje la filogenia fundada en el ADN y se aproxime al ideal de las categorías equivalentes.

A pesar de ello se sigue disputando acerca de cómo clasificar los organismos; unos taxónomos prefieren fundamentar el rango de las categorías en su evaluación del grado de especialización morfológica de los grupos. Sobre esta base, los dos grupos de barbudos podrían ir en la misma familia, y los tucanes en una familia o superfamilia aparte. Tal clasificación atiende al aspecto característico de las aves, pero oculta su filiación genética. En una ordenación tradicional, hoy día de uso generalizado, los tucanes, barbudos y algunos grupos más se clasifican como sigue:

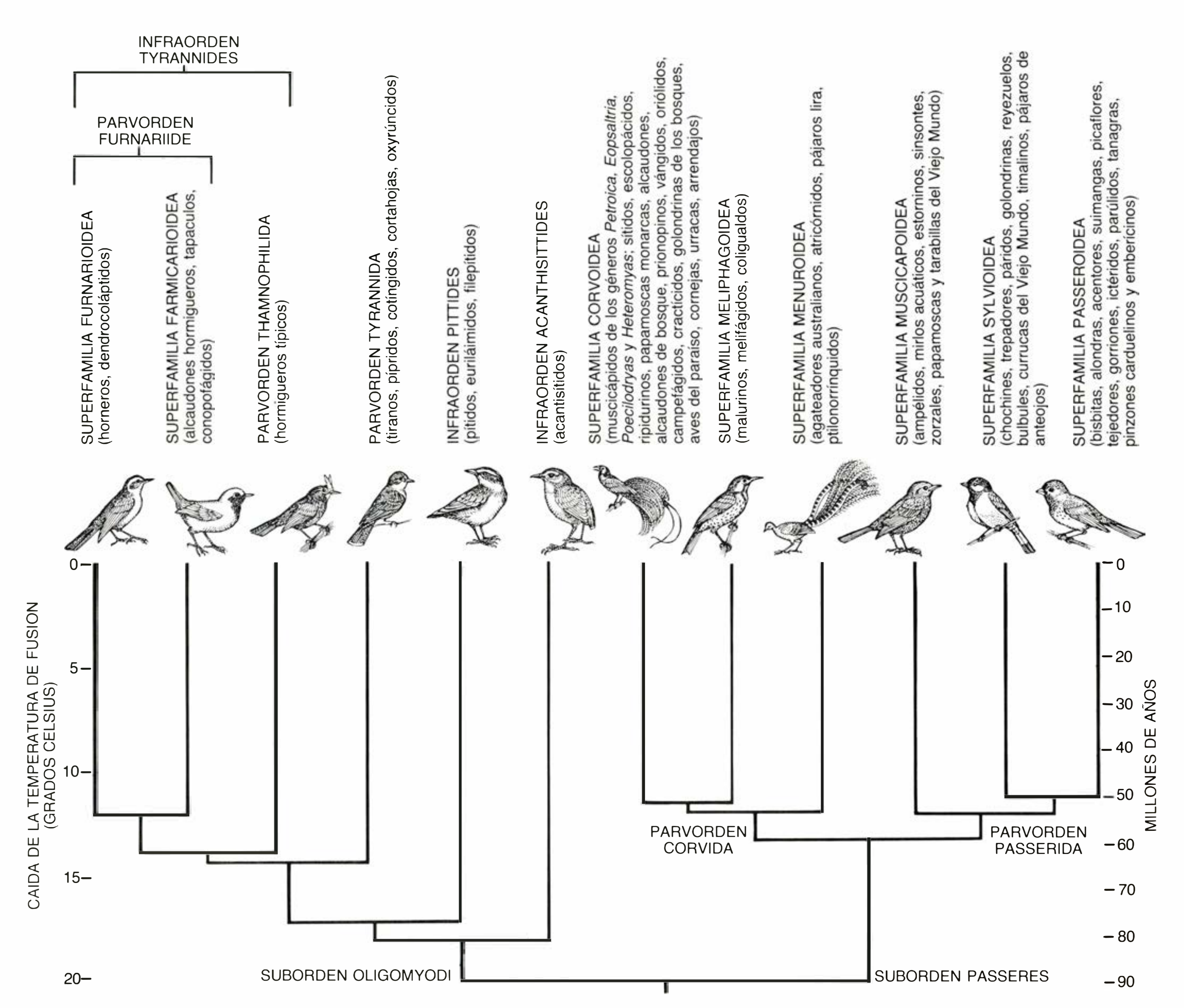
Orden Piciformes
- Suborden Galbulae
  - Superfamilia Galbuloidea
    - Familia Galbuloidae (jacamares)
    - Familia Bucconidae (bucónidos)
  - Superfamilia Capitonoidea
    - Familia Capitonidae (barbudos)
    - Familia Indicatoridae (indicadores)
  - Superfamilia Ramphastoidea
    - Familia Ramphastidae (tucanes)
- Suborden Pici
  - Familia Picidae (picos)

Además de ser esta clasificación extraña a los datos del ADN sobre los tucanes y barbudos, el ácido nucleico indica que los jacamares y los bucónidos del Nuevo Mundo deberían colocarse en un orden aparte, no en los Piciformes. No hay indicios de que el debate sobre cómo clasificar plantas y animales se vaya a resolver pronto.

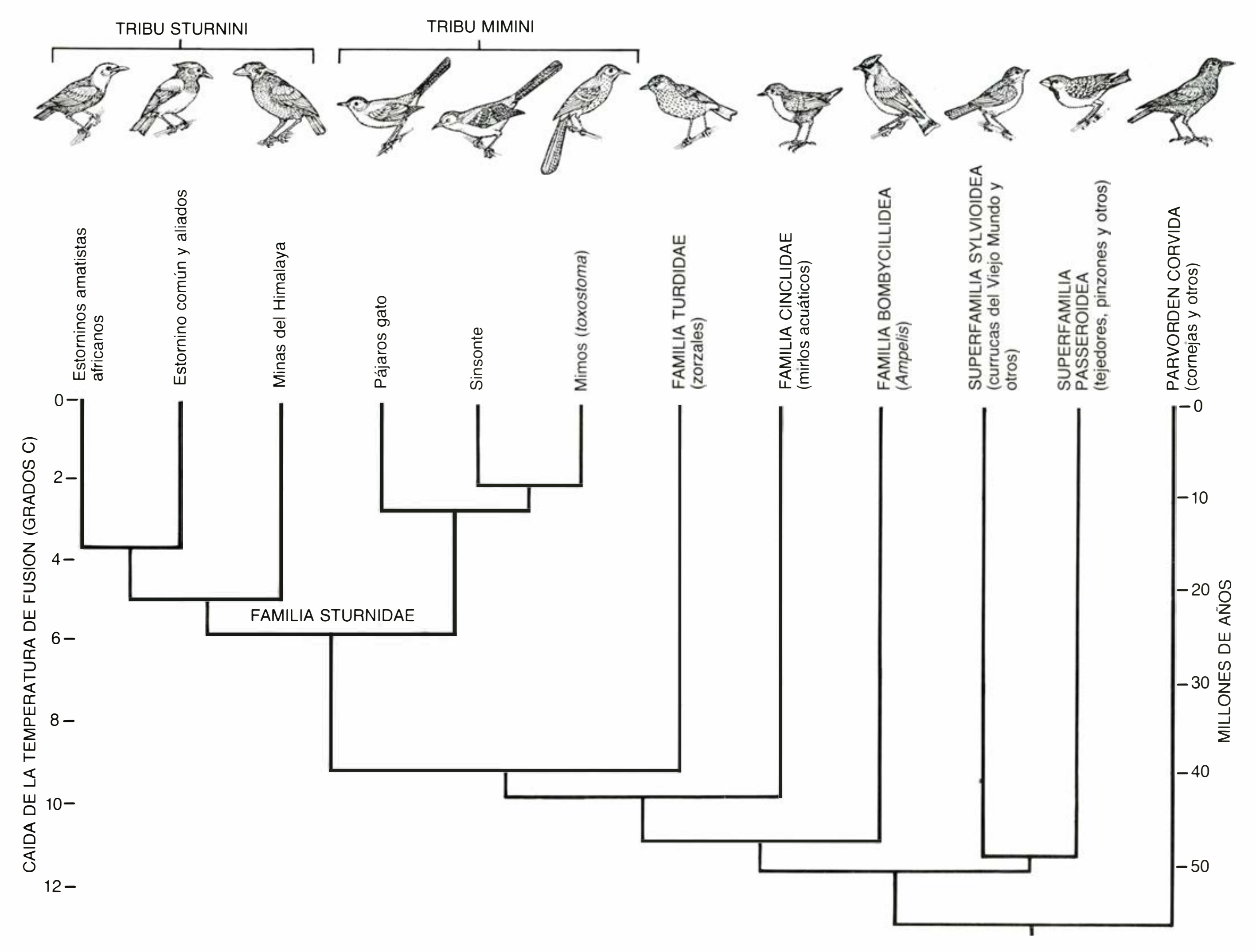
Los buitres del Viejo Mundo guardan estrecho parentesco con las águilas y los gavilanes. Los del Nuevo Mundo –entre ellos el cóndor, el buitre de cuello rojo y el zopilote– se parecen superficialmente a los buitres del Viejo Mundo. Ambos grupos son carroñeros y, por regla general, se han puesto juntos en el orden Falconiformes: aves de presa diurnas. Sin embargo, los buitres del Nuevo Mundo comparten muchos rasgos morfológicos con las cigüeñas, y algunos taxónomos arguyen que unos y otras pertenecen al mismo orden. Esta ordenación fue propuesta por Alfred B. Garrod en los años setenta del siglo pasado, y por David Ligon, a la sazón en la Universidad de Michigan, en 1967, pero las clasificaciones recientes han ignorado la evidencia de la alianza cóndor-cigüeña y continúan asignando los cóndores y sus allegados a los Falconiformes.

La comparación del ADN ocupa las indicaciones morfológicas que apuntan a que los buitres del Nuevo Mundo y las cigüeñas son parientes muy próximos; los datos indican que los grupos se separaron de un ancestro común unos 35 a 40 millones de años atrás. Las similitudes entre los buitres del Viejo y el Nuevo Mundo se deben a la evolución convergente relacionada con sus hábitos carroñeros.

Las aves omnipalmadas se caracterizan por presentar membranas entre los cuatro dedos: pelícanos, cormoranes, alcatraces, patos aguja, rabihorcados y aves sol. Todos, salvo las últimas, tienen también una bolsa subyugular muy visible entre las dos ramas



6. FILOGENIA DE LOS PAJAROS, grupo que comprende 5300 de las 9000 especies de aves vivientes. Dicha filogenia se reconstruyó a partir de comparaciones de ADN. Para cada bifurcación del árbol, la escala de la izquierda indica el número de grados centígrados que ha disminuido el punto de fusión medio de los híbridos formados por los ADN de las especies representativas de los dos linajes respecto de los híbridos de ADN perfectamente apareados. La escala de la derecha indica la fecha en que se produjo las ramificaciones. La reconstrucción afecta a las clasificaciones tradicionales de las aves actuales. En el suborden Oligomyodi, al que pertenecen la mayoría de los pájaros de Suramérica, el ADN mostraba que a los alcaudones hormigueros que viven en el suelo les correspondía un linaje distinto del propio de los alcaudones hormigueros típicos. En el suborden Passeres, los resultados definían dos grupos distintos; a saber: los parvórdenes Corvida y Passerida. Los Corvida se originaron en Australia, aunque algunos grupos se encuentran hoy día distribuidos por todo el mundo.



7. ESTORNINOS Y MIMOS ocupan ramas contiguas del árbol filogenético aviario, según los datos de la hibridación de ADN-ADN. Se ha considerado a los estorninos (tribu Sturnini) parientes de las cornejas y a los mimos se les ha colocado cerca de los zorzales. Si esta clasificación fuera correcta, los ancestros de los mimos y los estorninos se habrían separado hace casi 60 millones de años. Los datos sobre puntos de fusión de híbridos señalaban, en cambio, que los estorninos y los mimos son parientes muy próximos, que se separaron hace unos 25 millones de años. Ambos grupos están emparentados con los zorzales.

de la mandíbula inferior; en las aves sol, dicha bolsa es pequeña y está oculta. Debido fundamentalmente a estos dos caracteres compartidos, las omnipalmadas se han agrupado dentro del orden Pelecaniformes, aunque a veces se ha sugerido que las aves sol y los rabihorcados están emparentados con algún otro grupo.

Otro ave, el pico zapato, ha sido propuesto como miembro del mismo grupo. Se trata de un ave grande, parecida a una cigüeña, con un pico inmenso, que vive en los pantanos de Africa oriental y se alimenta de peces pulmonados y otras presas acuáticas. Se ha visto generalmente en el pico zapato un pariente de las cigüeñas o de las garzas, pero un estudio de su esqueleto, en 1957, llevó a Patricia A. Cottam, por entonces en el Museo Británico, a concluir que se trata de un pariente muy próximo de los pelícanos. Las pruebas de Cottam fueron rechazadas por la mayoría de los taxónomos como resultado de la evolución convergente, pero nuestras comparaciones de ADN las apoyan. La divergencia entre el pizo zapato y los pelícanos se produjo hace 35 o 40 millones de años. El grupo más próximo al del pelícano-pico zapato resulta ser el que incluye las cigüeñas y los buitres del Nuevo Mundo. Los dos grupos se separaron 40 o 45 millones de años atrás.

Las sorpresas no habían terminado. El ADN mostraba además que el orden tradicional Pelecaniformes, en el que se habían colocado las omnipalmadas, era un grupo polifilético: compuesto por varios subgrupos más estrechamente emparentados con otras aves de lo que están entre sí. Los pelícanos son parientes muy allegados del pico zapato, las cigüeñas y los cóndores. Los cormoranes, patos aguja y alcatraces están relacionados entre sí y parecen emparentados de lejos con las garzas; los rabihorcados están vinculados con los albatros y los petreles, y las aves sol parecen representar un linaje independiente, sin parientes vivos próximos. Así pues, el pie omnipalmado y la bolsa subyugular, o evolucionaron por convergencia en linajes independientes, o se heredaron de un remoto ancestro común de varios grupos de aves. En los descendientes que no presentan estos caracteres su base genética podría estar reprimida. Se conocen genes durmientes de este tipo en varios grupos de aves y otros animales.

Ya en el pasado se habían puesto de manifiesto grupos polifiléticos de linajes aviarios. En algunas clasificaciones antiguas, las aves con pie palmado (pie con membranas sólo entre los tres dedos anteriores) se agrupaban juntas. Pronto se hizo evidente que no todas las palmadas –que incluyen patos, albatros, pingüinos, gaviotas, colimbos y

álcidos– estaban estrechamente emparentadas, y se asignaron a varios grupos distintos. En el caso de las omnipalmadas, sin embargo, con la bolsa subyugular como prueba a favor, parecía imposible que no pertenecieran a un grupo monofilético: un grupo en el que todos los miembros comparten el mismo ancestro común más próximo.

En un trabajo reciente, Joel Cracraft, del Hospital Clínico de la Universidad de Illinois en Chicago, comparaba 45 caracteres del esqueleto y siete del comportamiento entre las omnipalmadas y los pingüinos, colimbos, zampullines, albatros, petreles y el pico zapato. Encontró 12 caracteres que apoyaban su hipótesis de que las especies omnipalmadas formaban un grupo monofilético, y seis que indicaban que los albatros y los petreles eran el grupo hermano, o linaje consorte, de las aves omnipalmadas. Entre éstas, las aves sol se presentaban como un linaje distinto del de las omnipalmadas. Entre las otras, los rabihorcados parecían ser los descendientes de la rama más antigua, seguidos, en orden de ramificación, de los pelícanos, alcatraces, patos aguja y cormoranes.

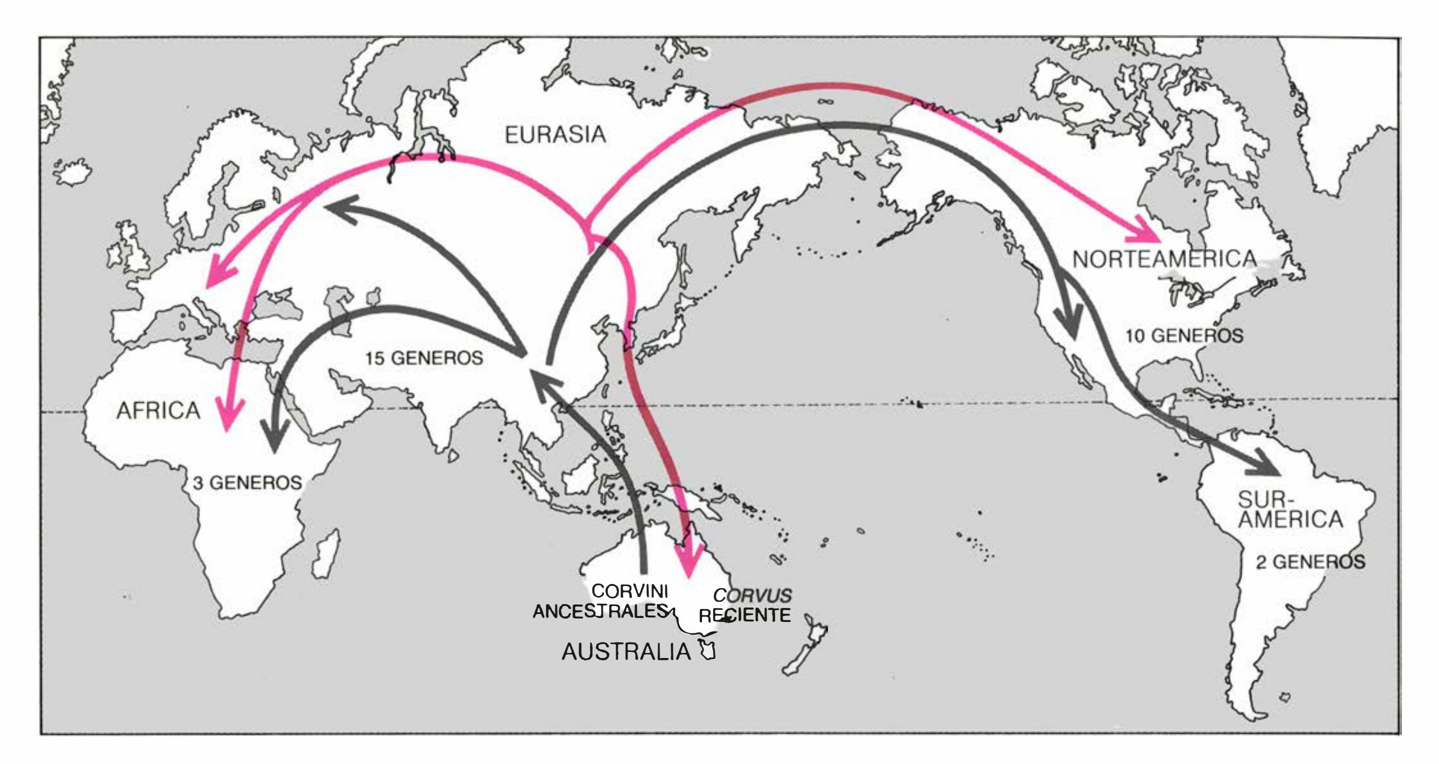
Cracraft descartaba el pico zapato como pariente de las omnipalmadas y atribuía su similitud con los pelícanos a la convergencia. Hay desacuerdos manifiestos entre las comparaciones de ADN y las pruebas morfológicas que Cracraft empleó, pero hay también varias congruencias: el parentesco entre las omnipalmadas (los rabihorcados en particular) y los albatros y petreles, la posición aislada de las aves sol y la estrecha relación entre los alcatraces, patos aguja y cormoranes. Las mayores discordancias se refieren al parentesco entre los pelícanos y el pico zapato, así como a la posición que los pelícanos ocupan en el contexto de las demás omnipalmadas.

No es muy factible que las pruebas de la polifilia del orden Pelecaniformes, basadas en el ADN, sean aceptadas por la mayoría de los ornitólogos en breve plazo. A pesar de todo, auguramos que las oportunas comparaciones revelarán que los datos morfológicos son, como en el estudio de Cottam en el año 1957, coherentes con los del ADN.

Las gangas son aves que se parecen a las palomas o a los chorlitos, propias de las regiones áridas de Africa, Asia y sur de Europa. Su parentesco con otras aves ha sido objeto de discusión durante más de un siglo. ¿Están vinculadas con las palomas, con los chorlitos o con las galliformes (gallos, faisanes y demás parientes)? Cada grupo tiene su candidato; la mayoría de los últimos participantes en el debate se inclinan por las palomas o por los chorlitos.

Los resultados del ADN son bastante claros: las gangas son el grupo hermano de una gran parte del orden Charadriiformes, que incluye los alcavaranes, chorlitos, ostreros, avocetas, cigüeñuelas, gaviotas, álcidos, palomas antárticas y corredores. Las gangas y el conjunto hermano están a su vez em-

8. LAS CURVAS DE FUSION DE LOS HIBRIDOS DE ADN señalan las diferencias entre los ADN de los estorninos y los mimos, y entre el ADN de éstos y el de los otros linajes. La escala horizontal muestra las temperaturas a que se calentaron los híbridos de ADN; la vertical, el porcentaje de ADN que ha fundido a cada tempertura, expresado como ADN de filamento sencillo. Las curvas de color muestran las propiedades de fusión de los híbridos de ADN en que ambos filamentos eran de *Toxostoma longirrostre* (*círculos*), pariente próximo de los mimos, o de un estornino amatista (*triángulos*). Las curvas negras, no rotuladas, corresponden a híbridos de *Toxostoma* y diversos estorninos (*círculos*), o de estornino y diversos mimos (*triángulos*). Las curvas restantes ilustran las propiedades medias de fusión de híbridos de ADN que constan de un filamento de ADN de mimo o estornino y un filamento de ADN del grupo indicado. Para comparar híbridos se emplea la temperatura a que la mitad del ADN híbrido ha fundido ($T_{50}H$). Cuanto más baja es la $T_{50}H$ de un híbrido de ADN, más pobre resulta el apareamiento entre los ADN y más remoto es el parentesco de las especies.



9. DISPERSION DE LA TRIBU CORVINI –que incluye cornejas, cuervos, arrendajos, urracas y sus parientes– esquematizada en un mapa (*flechas grises*). La hibridación de ADN–ADN identificó los Corvini como parte de un grupo mucho mayor de aves que evolucionó en Australia. El número de géneros en cada continente refleja el orden de su invasión después de que los ancestros de la familia pasaran de Australia a Asia hace unos 30 millones de años. El mayor número de géneros está en Asia y el menor en Suramérica, que los Corvini alcanzaron hace sólo tres o cinco millones de años. Los cuervos y las cornejas (género *Corvus*) evolucionaron en Asia y más tarde se propagaron por Africa y Norteamérica (*color*); en los últimos 100.000 años colonizaron Australia.

parentados muy de cerca con los correlimos y sus aliados. Así pues, las gangas no son ni palomas, ni chorlitos, si bien se aproximan a estos últimos más que a las palomas; las semejanzas entre las gangas y las palomas tienen que ser debidas a evolución convergente.

De las 9000 especies de aves supervivientes, unas 5300 pertenecen al orden Passeriformes; en él se incluyen currucas, zorzales, golondrinas, estorninos, gorriones, papamoscas, chochines, alondras, cuervos y otras especies, por lo general pequeñas. La mayoría de los pájaros de Suramérica se integran en el suborden Oligomyodi; se les conoce también por suboscinos. La estructura de la siringe (el aparato bucal) y otros caracteres anatómicos distinguen los suboscinos de los oscinos, o canoros, que componen el suborden Passeres (la otra rama de los Passeriformes). Los suboscinos del Nuevo Mundo evolucionaron en Suramérica cuando ésta quedó aislada del resto del mundo, como un continente-isla, desde hace unos 80 millones de años, en las postrimerías del Cretácico, hasta unos cinco millones de años atrás.

Lección evolutiva enseñada por los suboscinos del Nuevo Mundo es la que atañe a los alcaudones hormigueros, grupo de unas 235 especies que tradicionalmente quedó adscrito a la familia Formicariidae. A principios de los años sesenta, Mary Heimerdinger Clench y Peter L. Ames, ambos de la Universidad de Yale, descubrieron que algunos alcaudones hormigueros tenían dos muescas profundas en el borde posterior del esternón o quilla; las restantes especies presentan cuatro. Ames descubrió, asimismo, que los dos grupos diferían en la musculatura de la siringe. Las 185 especies con dos muescas ocupan cierto abanico de hábitats, pero las 50 con cuatro muescas son habitantes del suelo y presentan patas largas y cola corta. Clench y Ames subrayaban también que el esternón de cuatro muescas se presenta en otros dos grupos de aves: los tapaculos (familia Rhinocryptidae) y los conopofágidos (familia Conopophagidae). Ambos investigadores señalan que los alcaudones hormigueros del suelo están más estrechamente emparentados con esos grupos que con los otros alcaudones hormigueros.

El ADN puso de manifiesto las mismas alianzas. Las comparaciones mostraron que los alcaudones hormigueros de dos muescas se separaron del linaje de los de cuatro muescas antes de que estos últimos divergieran de los tapaculos y los conopofágidos. Así pues, las pruebas morfológicas y moleculares coincidían, y los datos del ADN proporcionaron el orden de la ramificación y las fechas aproximadas de las divergencias.

La otra rama de los pájaros, el suborden Passeres, comprende 4000 de las 5300 especies de pájaros. Las comparaciones de ADN revelaron que el suborden Passeres se compone de dos grupos mayores que llamamos parvórdenes Passerida y Corvida. Estos dos linajes se separaron de un ancestro común hace 55 o 60 millones de años. Los datos indican que los Passerida evolucionaron en Africa, Eurasia y Norteamérica, y los Corvida en Australia.

Desde los 60 a los 30 millones de años, durante el Terciario temprano y medio, Australia quedó aislada de otras masas de tierra. Los Corvida desarrollaron muchas formas ecológica y morfológicamente especializadas –entre ellas, currucas, papamoscas, zorzales, agateadores, timalinos y nectarínidos–, formas muy semejantes a las que dieron lugar los Passerida en otras partes del mundo. Sin embargo, las aves de Australia fueron descubiertas y bautizadas después de que los ornitólogos europeos hubieran clasificado las correspondientes a la mayoría del resto del mundo. Los pájaros australianos parecían encajar en categorías que habían sido fundadas a partir de ejempla-

res de otras regiones. De este modo, los pájaros australianos tipo curruca se asignaron a la familia Sylviidae (que incluye las currucas genuinas), los papamoscas australianos a la familia Muscicapidae (los papamoscas afro-euroasiáticos) y los agateadores a la Certhiidae (los agateadores eurasio-americanos). Las sitelas –aves autralianas parecidas a los trepadores– fueron colocadas entre la Sittidae (la familia de los trepadores verdaderos) y los melífagos australianos se agruparon con las suimangas afro-asiáticas que comen néctar, superficialmente similares.

Al comparar los ADN entre los diversos pájaros australianos y entre las especies australianas y sus hipotéticos parientes de Africa, Eurasia y Norteamérica, descubrimos que los endémicos de Australia están más estrechamente emparentados entre sí de lo que están con sus equivalentes morfológicamente afines de otros continentes. La evolución convergente había producido semejanzas entre especies no emparentadas de dos parvórdenes, y los taxónomos del museo habían juntado las especies en grupos polifiléticos que contenían miembros de ambos, los Corvida y los Passerida. El mismo error se ha cometido hoy día con la mayor parte de las 400 especies de pájaros de Australia y Nueva Guinea. Muchas convergencias son tan sutiles que el verdadero parentesco de los Corvida y los Passerida probablemente no habría sido resuelto con sólo comparaciones anatómicas.

Resultado de esta confusión fue que quedara oculta la fascinante historia de la filogenia de los Corvida, que corre paralela a la de los marsupiales. Ambos grupos evolucionaron mientras Australia estaba aislada; como los pájaros australianos, los marsupiales se difundieron por muchos nichos ecológicos similares a los ocupados en Africa, Eurasia y Norteamérica por otro grupo, en este caso los mamíferos placentarios. Durante el proceso, algunos marsupiales asumieron formas semejantes a las de aquellos otros mamíferos. Empero, a diferencia de los pájaros australianos, no hubo confusión de los marsupiales con sus equivalentes de otros lugares merced al marsupio, o bolsa característica, así como a otros rasgos distintivos.

Los Corvida de Australia produjeron los ancestros de los pocos grupos que pudieron emigrar a Asia mientras Australia derivaba hacia el norte durante el Terciario. Entre los grupos cuyos ancestros evolucionaron en Australia está la tribu Corvini, que incluye las mismas especies que la tradicional familia Corvidae: cuervos, cornejas, arrendajos, urracas y sus allegados.

Hoy día existen 23 géneros de Corvini; de ellos, 15 se presentan en Eurasia y 10 en Norteamérica. Sólo se encuentran tres géneros en Africa, y en Suramérica la tribu está representada únicamente por dos géneros de arrendajo. Los números revelan la cronología y la pauta de la dispersión a partir de Australia. La radiación más temprana se produjo en el sureste de Asia, y los miembros de los linajes ampliaron luego su área de distribución a Europa, Africa y Norteamérica. Suramérica fue el último continente invadido. Estuvo aislado de Norteamérica hasta hace entre tres y cinco millones de años; los dos géneros de arrendajo que hoy día se dan en Suramérica extendieron, por lo visto, su área de distribución a partir del norte, después de que el afloramiento de América Central proporcionara una conexión terrestre entre los continentes. Los cuervos y las cornejas del género *Corvus* se originaron probablemente en Eurasia y se difundieron por casi todo el mundo (excepto Suramérica), colonizando con el tiempo incluso Australia.

Entre los muchos resultados sorprendentes de la comparación de ADN, ninguno más inesperado que el descubrimiento del estrecho parentesco entre otros dos grupos de pájaros: los estorninos, oriundos del Viejo Mundo, y los sinsontes y mimos del Nuevo. Por lo común, se ha considerado que los estorninos eran parientes de las cornejas, mientras que a los sinsontes se les colocaba, acertadamente, cerca de los zorzales. Si los estorninos fueran parientes próximos de las cornejas, serían miembros de los Corvida, pero el ADN identifica, con toda claridad, a los sinsontes como pertenecientes a los Passerida. Así pues, si la clasificación tradicional fuera correcta, los linajes de los estorninos y los sinsontes se habrían separado hace entre 55 y 60 millones de años.

Sin embargo, las comparaciones de ADN revelaban que los dos linajes divergieron hace unos 25 millones de años. Otras investigaciones apoyan esta estrecha alianza estornino-sinsonte: comparaciones inmunológicas de proteínas musculares realizadas en 1961 por William B. Stallcup, Jr., de la Universidad Metodista del Sur; estu-

10. LOS BUITRES DEL NUEVO MUNDO Y LAS CIGÜEÑAS son parientes muy próximos, según la filogenia reconstruida a partir del ADN. Superficialmente, los buitres del Nuevo Mundo (que incluyen los cóndores) se parecen a los del Viejo. Las semejanzas tienen que deberse a evolución convergente; los buitres del Viejo Mundo pertenecen a un grupo diferente de linajes. Los estudios del ADN mostraban también que los pelícanos y el pico zapato, una especie africana, son los vecinos más inmediatos de los cóndores y las cigüeñas en el árbol filogenético. Además, el ADN confirmó la vinculación del pico zapato con los pelícanos.

dios de la anatomía de la región de la cabeza realizados en 1953 por William J. Beecher, a la sazón en la Universidad de Chicago, y comparaciones de la siringe efectuadas por Wesley E. Lanyon, del Museo Americano de Historia Natural. A lo mejor es significativo que algunos estorninos –los minás, por ejemplo– sean, como los sinsontes, excelentes imitadores. Hasta el estornino pinto remeda los cantos de otras aves.

El estrecho parentesco entre los estorninos y los sinsontes refleja quizá la historia del cambio climático en el hemisferio norte. Durante el Terciario temprano y medio, 65 a 30 millones de años atrás, el clima del Artico era templado; en el norte de Canadá y Groenlandia crecían árboles planifolios. Parece probable que el ancestro común de los estorninos y los sinsontes estuviera ampliamente distribuido por esas regiones, que hacían de puente entre el Viejo y el Nuevo Mundo. Los fósiles vegetales indican que el clima empezó a enfriarse unos 30 millones de años atrás, y la población ancestral presumiblemente se desplazó hacia el sur. Hace unos 25 millones de años, las poblaciones de América y Eurasia quedaron aisladas y empezaron a diferenciarse.

Estos son sólo algunos de los descubrimientos que la hibridación del ADN ha hecho posible. Las comparaciones de ADN nos enfrentan con nuevas hipótesis sobre el parentesco de las aves. Si la filogenia basada en el ADN se acerca más a una filogenia verdadera, será congruente con los datos de otras fuentes. Los resultados que hemos obtenido hasta ahora concuerdan con la historia geológica mejor que otras muchas propuestas anteriores sobre la filogenia de las aves, y el parentesco apuntado por los datos del ADN se ve apoyado generalmente por al menos algunos caracteres anatómicos. Creemos que ciertos aspectos de la morfología resultarán congruentes en todos los casos con los datos suministrados por la hibridación del ADN.

Con todo, el ADN y los caracteres morfológicos empleados tradicionalmente para reconstruir la filogenia sirven para proporcionar diferentes tipos de información. La morfología muestra hasta qué punto la selección natural ha modificado la estructura para adaptar los organismos al medio ambiente, mientras que la comparación de ADN brinda un testimonio directo de la pauta de la ramificación y las fechas aproximadas en que ésta se produjo. La morfología es funcional; el reloj de ADN marca el compás.

Técnicas de la cantería inca

¿Cómo fue posible extraer sillares tan monumentales, desbastarlos y unirlos de tal modo que ni la hoja de un cuchillo quepa entre ellos? Para responder a esta pregunta el autor trabajó en una cantera inca

Jean-Pierre Protzen

La cultura inca no alcanzó su esplendor hasta más o menos cien años antes de producirse la conquista española en 1532. Durante ese siglo, la sociedad inca pasó de ser un pequeño estado agrícola del centro de Perú a convertirse en un poderoso imperio que se extendía desde Chile hasta Ecuador. Uno de los aspectos de su florecimiento cultural fue su ambicioso programa de construcciones iniciadas por Pachacuti, el noveno Inca, en 1438. Encomendó a sus canteros la reconstrucción de Cuzco, la capital del floreciente imperio, tarea que no se interrumpió con su muerte. Sus sucesores ampliaron las construcciones bastante más lejos de las fronteras de Cuzco. A través de todo Perú fueron levantándose templos, palacios, almacenes y cisternas, que en algunos casos sustituyeron a edificaciones precedentes.

El plan constructivo de Pachacuti no sólo era ambicioso, sino también innovador. Aunque las primitivas estructuras incas fueron probablemente de adobe o de mampostería, las nuevas se hicieron sin mortero de ningún tipo. Colosales sillares de casi 100.000 kilos fueron ajustados entre sí de suerte que ni siquiera hoy la hoja de un cuchillo cabe entre ellos.

Durante cientos de años los visitantes de Perú quedaban intrigados por el tamaño de los sillares de la cantería inca y por la precisión con que cada sillar se insertaba entre sus vecinos. El hecho de que los incas careciesen de herramientas de hierro hacía aún más sorprendentes sus construcciones. En 1979, durante mi regreso a Estados Unidos después de un tiempo de ejercer la docencia en Brasil, visité algunos de los principales asentamientos incas y me maravillé de la habilidad de sus construcciones. Cuando pregunté a mis guías sobre cómo los incas desbastaron los grandes sillares y los agruparon en los edificios, las respuestas que obtuve fueron poco satisfactorias. De regreso a la Universidad de California en Berkeley, donde enseño arquitectura, pregunté a mis colegas arqueólogos por bibliografía sobre las técnicas constructivas incas. Para mi sorpresa, me informaron que no existía.

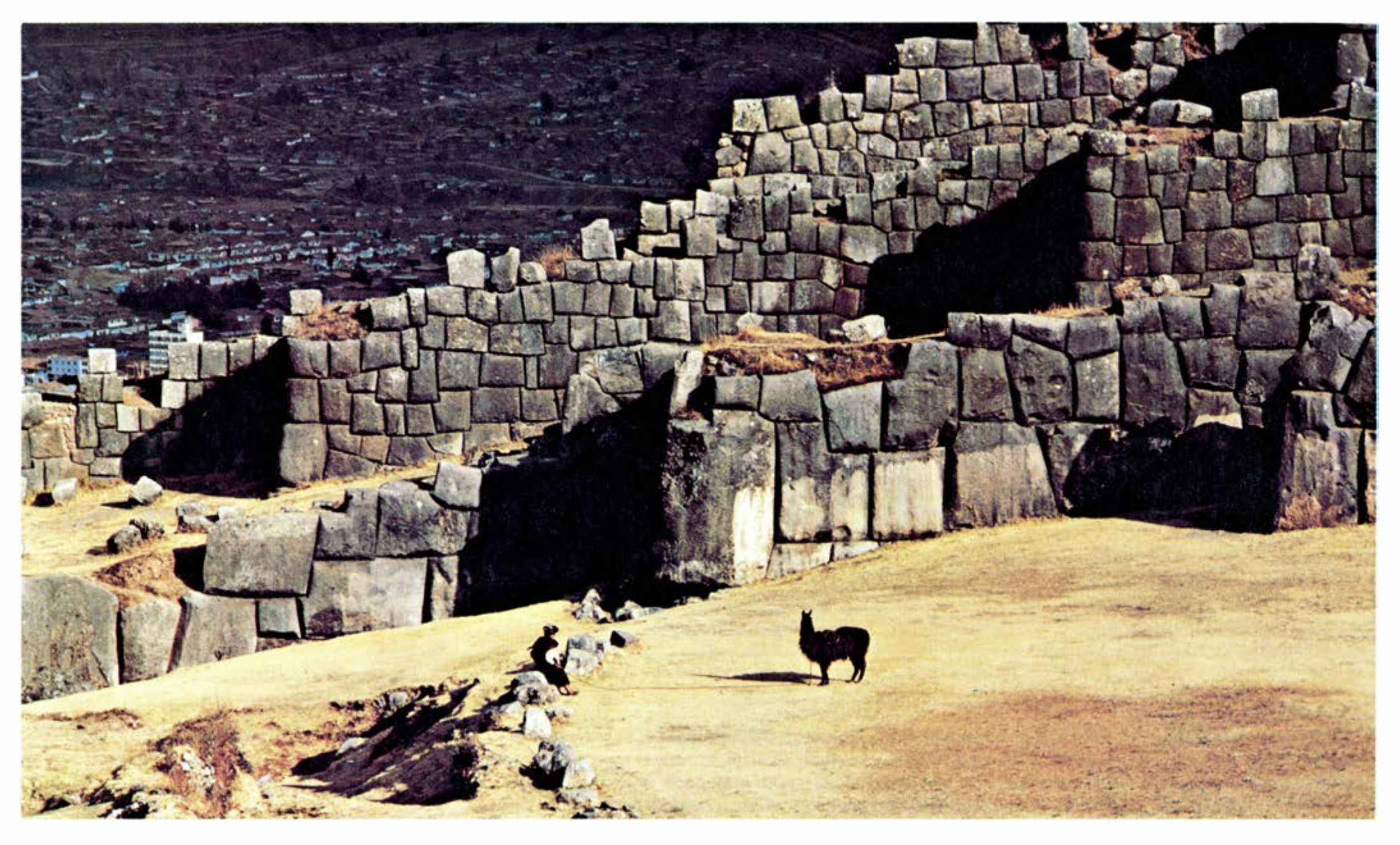
Aunque no soy arqueólogo, me mueve un interés profesional por las técnicas de construcción. Después de darle vueltas al asunto decidí investigar los muros incas. Un permiso sabático en 1982 me dio oportunidad de pasar seis meses en Perú. Desde entonces he regresado durante, al menos, un mes en cada año sucesivo. Mi investigación no podía circunscribirse al terreno de las hipótesis. Cuando formulaba alguna, intentaba de inmediato comprobarla. Usando materiales existentes en los asentamientos incas, corté, pulí y ajusté sillares para mostrar que esas tareas podían haber sido efectuadas por los incas como yo proponía. Aún existen aspectos sin resolver, especialmente en lo referente al manejo y transporte de los colosales sillares hasta pie de obra, pero la mayor parte de mi investigación ha resultado un éxito. Gracias a ella, las especulaciones sobre cómo los incas levantaron sus hermosas estructuras de piedra pueden empezar a ser ahora sustituidas por conocimientos empíricos.

Gran parte de mi investigación se centró en el análisis específico de los muros incas en la propia ciudad de Cuzco y en las "fortalezas" de Sacsayhuamán y Ollantaytambo. Aquélla está cerca de Cuzco, ésta se encuentra a orillas del río Urubamba, a unos 90 kilómetros al noroeste de la capital inca. Aunque muchos libros se refieren a Sacsayhuamán y Ollantaytambo como fuertes, recientes investigaciones arqueológicas sugieren que tuvieron una función más religiosa que militar. Aparte del valor que merecieran en la sociedad inca, los dos lugares son sorprendentes desde el punto de vista de la técnica constructiva. Sacsayhuamán es un amplio asentamiento defendido por tres muros sucesivos de piedra, de más de tres metros de altura cada uno. Ollantaytambo, construida en las estribaciones de una montaña, comprende un centro religioso, una residencia real y una ciudad de organización reticular.

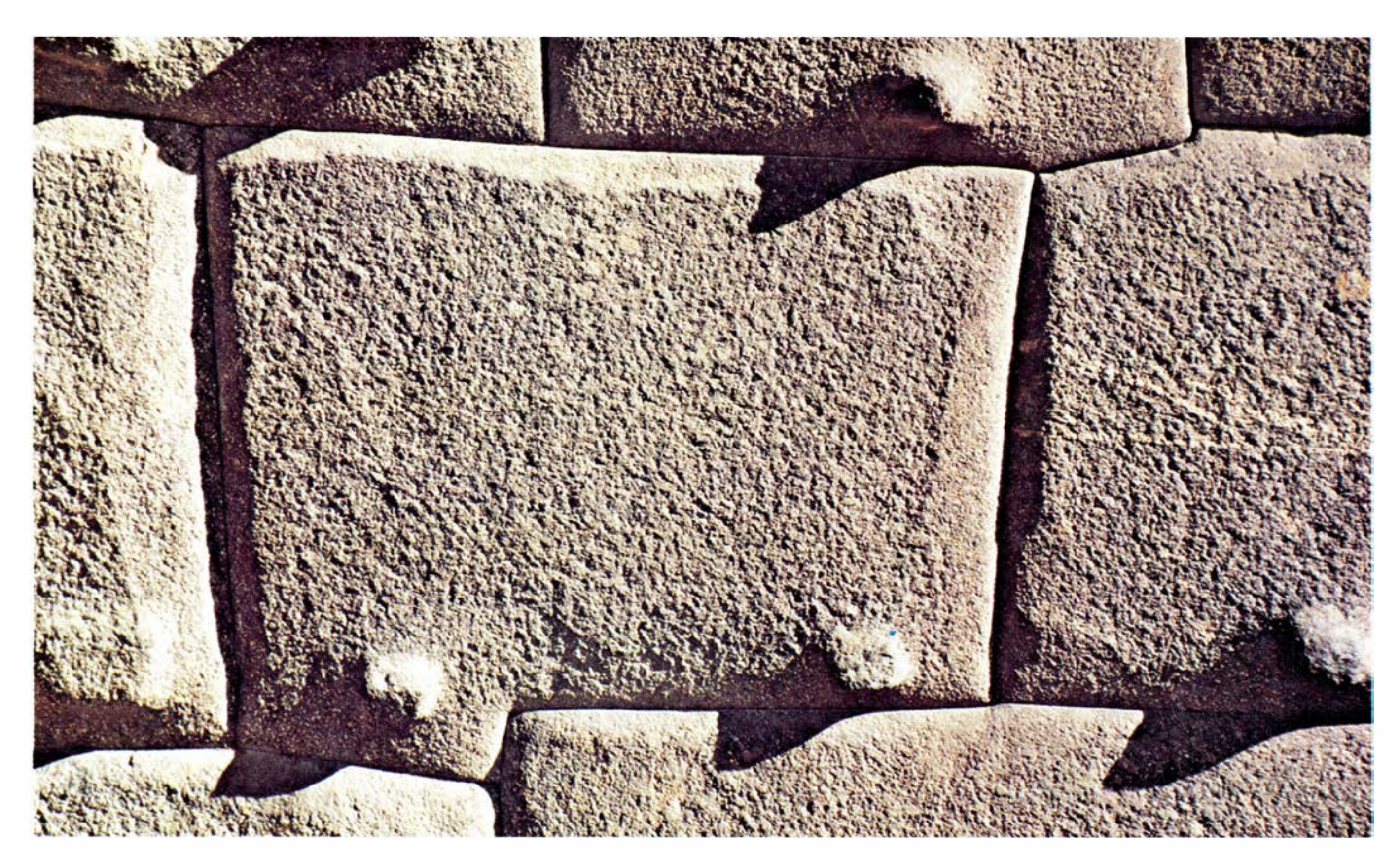
¿Cómo se construyeron estas grandes estructuras de piedra? Para facilitar el problema lo dividí en cuatro partes: la extracción de la piedra, su desbastado en bloques individuales, su ajuste y su transporte. Para investigar sobre la extracción visité varias canteras incas, de las que dos, Kachicata y Rumicolca, fueron analizadas en detalle. La primera se sitúa a unos cuatro kilómetros de Ollantaytambo, al otro lado de Urubamba. Sus canteras aportaron el pórfido (granito rojo) con que se construyó el Templo del Sol, el edificio más importante de Ollantaytambo. Rumicolca está a 35 kilómetros al suroeste de Cuzco y suministró la andesita, una roca ígnea utilizada por los constructores de Pachacuti en la reedificación de la capital imperial.

Varios indicios circunstanciales señalaban que la extracción tuvo gran importancia para los incas. Kachicata y Rumicolca eran lugares remotos, con difíciles accesos y lejanos a los puntos de construcción en que los sillares se agruparon. El motivo por el que los incas explotaron canteras con tantos inconvenientes seguramente radicaba en la alta estima que se tenía del material de ellas obtenido.

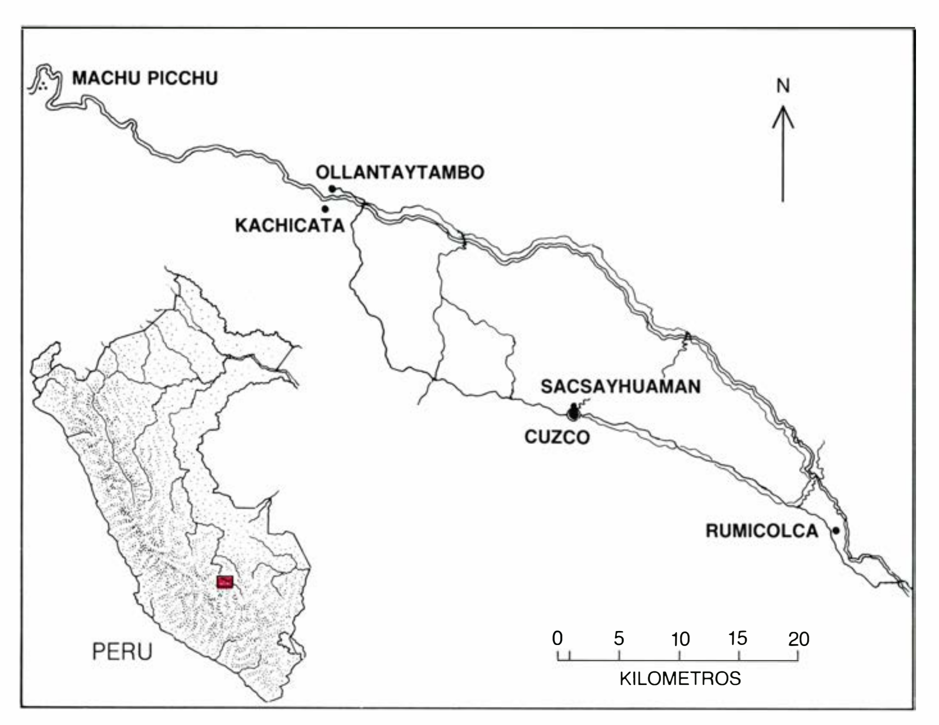
Además, la organización interna de las canteras demuestra el extraordinario cuidado que se ponía en el proceso de obtención de sillares para la construcción. Tanto Rumicolca como Kachicata presentan una red de caminos que conduce a los puntos en que los sillares se obtenían. A las canteras de



1. SACSAYHUAMAN, cerca de Cuzco, es una de las obras de cantería más impresionantes de los incas. La fotografía muestra parte del sistema defensivo, que incluye tres muros, cada uno de más de tres metros de altura. Los sillares ciclópeos de estos muros pesan alrededor de 100.000 kilogramos. Aunque con cierta frecuencia se menciona a Sacsayhuamán como fortaleza, recientes investigaciones arqueológicas sugieren que fue probablemente un centro religioso.



2. EXTRAORDINARIO AJUSTE DE LOS SILLARES en las construcciones pétreas de los incas. Esta fotografía recoge un detalle de un muro de Ollantaytambo, conjunto que se encuentra a orillas del río Urubamba. El material es de un tipo de piedra llamada meta-arcosa. Los salientes de los bloques sirvieron para manejarlos a pie de obra, conservándose con frecuencia una vez terminado el muro. Los sillares están señalados por marcas dejadas por los martilos empleados para tallar la piedra. Dichas marcas son más menudas en los bordes que en el centro de las caras; se usaron, pues, martillos distintos en las dos zonas.



3. ALGUNOS YACIMIENTOS INCAS se concentran en el altiplano meridional, en la zona central de Perú, cerca de Cuzco. Esta ciudad fue la capital del imperio inca y en ella se alcanzó durante el siglo xv una de las más altas cotas en la técnica de ajustar sillares sin mortero. Los sillares de gran parte de las construcciones de Cuzco proceden de las canteras de Rumicolca. Ollantaytambo es un sorprendente conjunto de ruinas incas que, al igual que Sacsayhuamán, es citada con frecuencia como fuerte, cuando probablemente se tratase de un centro religioso. Las canteras cercanas a Kachicata suministraron la piedra de Ollantaytambo. Machu Picchu, una de las más famosas edificaciones levantadas por los incas, se asienta entre montañas. Urubamba y Vilcanota son dos nombres dados a un mismo río en dos partes diferentes de su curso.

Kachicata se llega por un camino que viene desde Ollantaytambo, al otro lado del Urubamba, y sube desde sus márgenes hasta una serie de puntos en donde la piedra desprendida naturalmente de la superficie de la roca se acumula formando considerables montones. Al llegar a dicho lugar, la carretera de acceso se divide en varios ramales hacia las canteras. Puede seguirse el trazado de la carretera porque se ha conservado bastante bien y está señalizada con casi 80 bloques incas abandonados.

El sistema de accesos tanto en las zonas llanas como en las pendientes menos acusadas lo constituían una serie de rampas que originalmente debieron estar cubiertas de grava. En las pendientes más inclinadas las rampas se sustituían por una especie de toboganes por donde los bloques se deslizaban libremente. El mayor de los toboganes de Kachicata tenía un terrible desnivel de 40 grados en una distancia de 250 metros. En el fondo del mismo se han encontrado cuatro bloques abandonados.

Las canteras de Rumicolca han sido explotadas intensamente desde la conquista y no están tan bien conservadas como las de Kachicata. Sin embargo, aún puede restituirse el trazado del sistema de caminos que conduce a las canteras. En ambas canteras los incas completaron los caminos de acceso con otras estructuras, tales como muros de contención, canales y núcleos de viviendas.

Aunque las dos canteras siguen un plan similar, los canteros utilizaron en Kachicata unos métodos ligeramente diferentes de los usados en Rumicolca. En aquélla, los incas no emplearon técnicas de cantería, en el sentido de lo que esto implica de cortar los sillares de la superficie de la roca o de extraerlos socavando el lecho de la misma. En lugar de eso, los canteros simplemente recorrían los lugares en que se acumulaban las piedras desprendidas de la roca madre y seleccionaban los bloques de granito rojo que se ajustaban a sus necesidades. Mis observaciones sugieren que cuando se elegía un bloque en Kachicata era mínimamente elaborado antes de ser trasladado a Ollantaytambo. Las últimas etapas de desbaste de la piedra y de ajuste para ensamblarla parece que fueron llevadas a cabo a pie de obra.

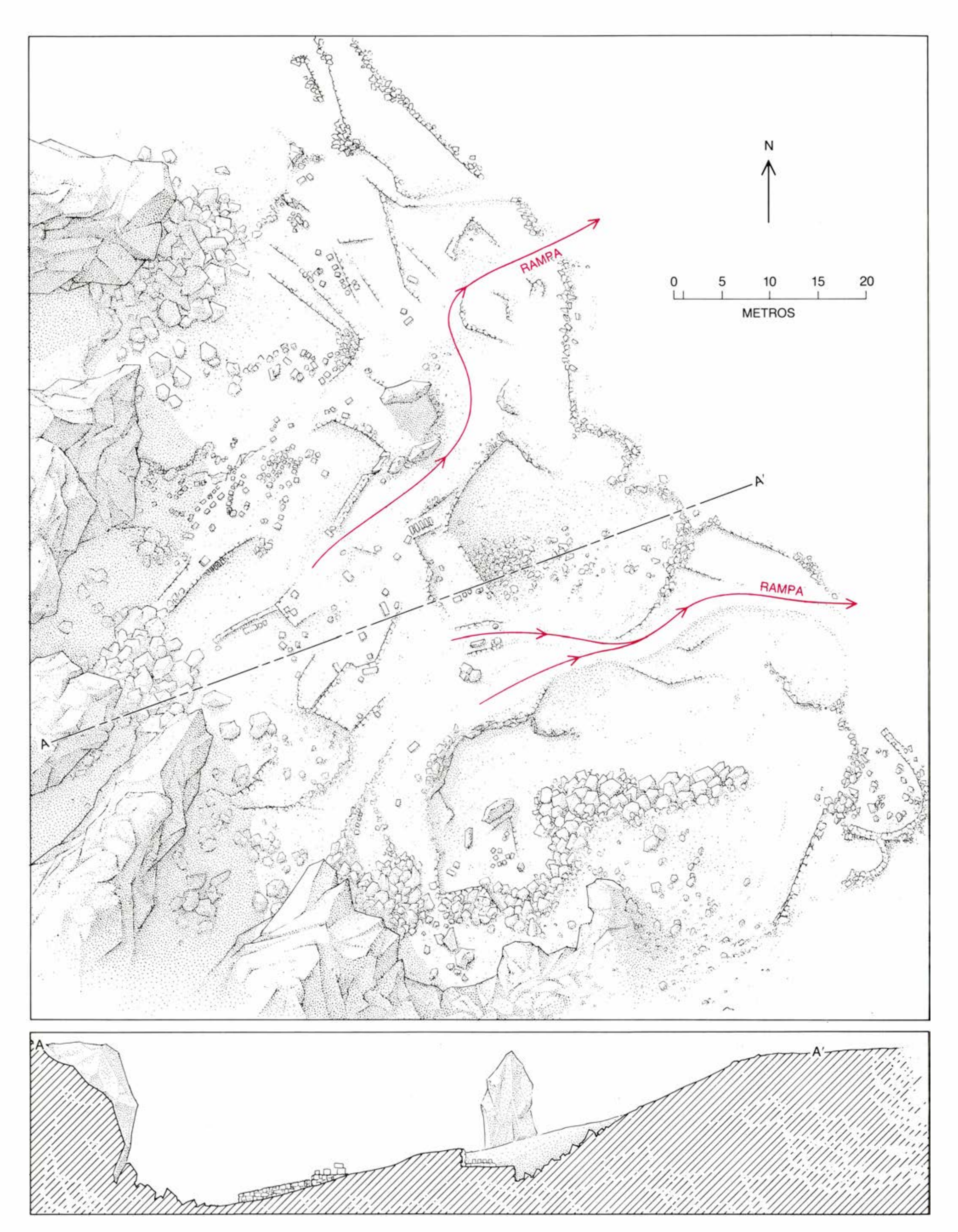
En Kachicata, esta dura tarea se iniciaba frecuentemente antes de que el bloque hubiese salido de la rampa por la que era conducido. Esto es bien patente al final de la rampa mayor de la cantera sur de Kachicata. Casi en el extremo de la misma, dos grandes bloques de piedra, uno de 4,5 × 2,5 × 1,7 metros y otro de 6,5 × 2,7 × 2,1 metros, están elevados sobre plataformas de piedra para trabajarlos. Aunque los bloques están parcialmente desbastados, la rampa de acceso no abarca la plataforma en que están situados.

Resulta intrigante que las marcas de cortes en estos bloques, así como en otros de las canteras incas, sean muy semejantes a las marcas encontradas en el remate del inacabado obelisco de Assuan en Egipto. En este y en los bloques de Kachicata existen rehundimientos redondos en la superficie. Es sabido que los egipcios daban forma a sus sillares golpeándolos con bolas de dolerita, una roca ígnea. Parece razonable pensar que los incas hicieran lo mismo.

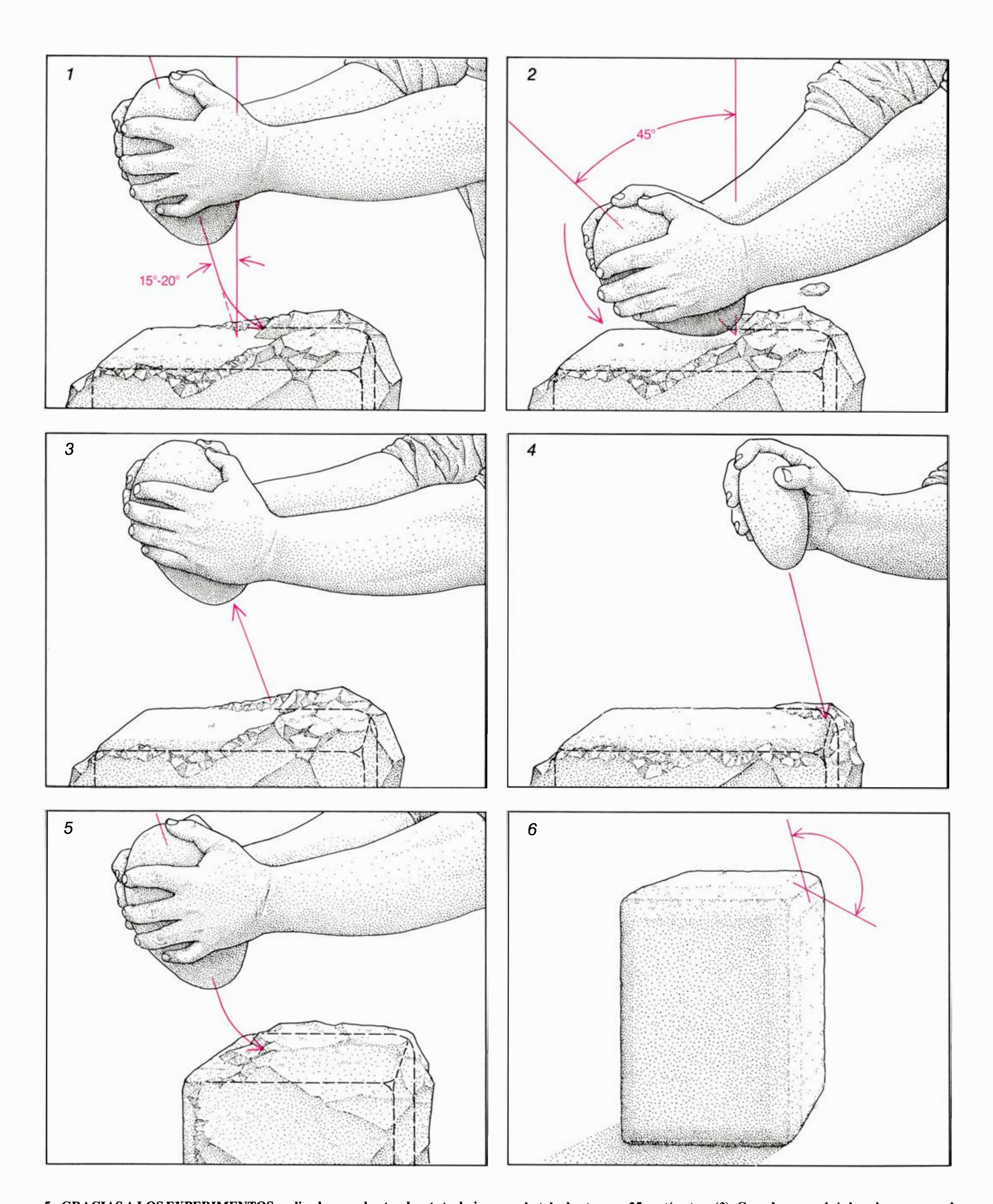
Después de una cuidadosa búsqueda por la cantera de Kachicata encontré algunas piedras redondeadas de cuarcita, una roca metamórfica que no se da en la cantera, aunque sí existe a lo largo de las márgenes del Urubamba. Un examen de las piedras de cuarcita reveló la presencia de marcas en el extremo menor de las mismas, lo que indicaba que fueron empleadas para golpear. Gracias a ellas llegué a la conclusión de que los canteros incas de Kachicata seleccionaban guijarros redondeados por el río en las márgenes del Urubamba y los utilizaban como martillos para darle una forma aún tosca a los bloques, antes de proceder al desbastado definitivo que se completaba en Ollantaytambo.

En Kachicata, por tanto, las piedras eran seleccionadas en los lugares en que se amontonaban las desprendidas de la roca madre, en lugar de obtenerse mediante técnicas de cantería, siendo sólo superficialmente desbastadas antes de ser transportadas. En Rumicolca, por el contrario, existió auténtica labor de cantero, pues los sillares se extraían de la superficie de las rocas. Debido a que Rumicolca fue explotada a partir de la Conquista e incluso en la actualidad, muchos de los vestigios de la explotación inca han sido eliminados. No obstante, tuve la fortuna de encontrar una cantera inca bien conservada en la zona de Rumicolca, en razón de su difícil acceso y a que no había sido explotada en tiempos modernos. La denominé La Llama, en homenaje a los dos petroglifos con llamas labrados en una de las caras de la roca.

Esta cantera se ha convertido en una excelente fuente de información sobre



4. CANTERA DE LA LLAMA, una de las mejor conservadas de todas las existentes en Rumicolca. Los canteros incas probablemente extrajeron sillares de la superficie de la roca (*a la izquierda*) con palanquetas de bronce o palos. Después de esto, pero antes de abandonar la cantera, recibían forma y se desbastaban. Esparcidos por los alrededores de dicha cantera existen 250 bloques abandonados que muestran diversas fases del desbastado. Examinándolos, el autor ha recreado los métodos incas para labrar la piedra. Los sillares utilizados se transportaron desde La Llama mediante rampas pavimentadas con grava.



5. GRACIAS A LOS EXPERIMENTOS realizados por el autor de este trabajo entendemos cómo pudieron los incas haber desbastado los sillares. Seleccionó un bloque de andesita, una roca ígnea, de la cantera La Llama. Después de darle una forma rectangular tosca, tomó un martillo de cuatro kilogramos y comenzó a golpear una de las seis caras (*1*). El martillo se sostuvo con fuerza entre las manos y se dejó caer en ángulo de 15 a 20 grados. Justo antes de golpear la piedra, el martillo, mediante un giro de la muñeca, alteraba su curso, consiguiendo un ángulo de impacto de unos 45 grados (*2*). Después de cada golpe, el martillo rebotaba hasta unos 25 centímetros (*3*). Cuando se concluía la primera cara, el bloque permanecía en la misma posición y se empleaba un martillo menor para preparar los bordes de la siguiente cara a desbastar (*4*). El martillo pequeño, que pesaba unos 560 gramos, se sostenía con fuerza para efectuar certeros golpes sobre el borde. Entonces se giraba el sillar, usándose de nuevo el martillo grande en la segunda cara (*5*). La técnica experimental empleada por el autor dio como resultado un bloque con ángulos ligeramente convexos, muy similares a los que se encuentran en los sillares incas (*6*). (Recreación gráfica de Michael Goodman.)

cómo los incas extraían y desbastaban sus sillares para la construcción. La extracción de andesita en Rumicolca no presenta grandes problemas técnicos. A menudo las rocas más densas aparecen suficientemente fracturadas en su estado natural, lo que facilita la extracción de bloques. Los canteros pudieron haber separado los bloques que ellos querían de la superficie de la roca con unas palanquetas parecidas a las encontradas en otros yacimientos incas. Dichas palanquetas, que son de bronce, miden casi un metro de longitud, son de sección cruciforme, de cuatro o cinco centímetros de lado, y rematan en punta. Con ellas se extrae la piedra de Rumicolca, aunque dichas palanquetas no habrían sido necesarias. Yo he visto a algunos canteros sacar las piedras de la superficie con estacas y los incas pudieron haber hecho lo mismo.

Comprender cómo los incas extrajeron sus piedras es un asunto bastante asequible. Comprender cómo las cortaron y desbastaron ofrece mayores dificultades técnicas. En esto, de nuevo, la cantera La Llama fue de gran ayuda. La característica más extraordinaria de esta cantera la aportan los 250 bloques incas distribuidos por sus alrededores. En contraposición a los sillares de Kachicata, los de Rumicolca eran generalmente acabados o casi acabados en cinco de sus seis caras mientras estaban en la cantera. Uno puede encontrar entre los 250 bloques de La Llama ejemplos de todas las fases de la producción, desde bloques en bruto hasta los más finamente desbastados. Examinando tales fases he logrado reconstruir el proceso seguido al manufacturar los bloques.

Una de las primeras tareas consistió en identificar las herramientas utilizadas en el desbastado de los sillares de la cantera La Llama. Rebuscando entre las lascas de andesita encontré piedras extrañas tanto por su constitución como por su forma. Mi investigación dio un giro a partir del hallazgo, pues estaba seguro de su empleo como martillos para dar forma a los sillares. Al igual que en Kachicata, la mayoría de esas extrañas piedras eran guijarros de río. Estos parecían proceder de las orillas del río Vilcanota, que corre cerca de la cantera. Unos cuantos de estos martillos eran cuarcita pura, otros eran granito y algunos olivino basáltico.

Los martillos y la andesita de los sillares tienen casi la misma dureza. Un sistema estándar de medir el grado de dureza es la llamada escala de Mohs. En dicha escala, al talco, el mineral más blando, se le asigna un coeficiente 1, mientras que al diamante, el más duro, se le otorga un coeficiente 10. Los martillos que encontré en la cantera La Llama tenían un coeficiente de casi 5,5, aproximadamente el mismo grado de dureza que la andesita de los sillares. Los martillos, no obstante, eran más resistentes que los sillares. Los diferentes grados de enfriamiento que se dieron durante la formación de la andesita determinó la aparición de tensiones en la roca. Cuando se golpea la andesita, las tensiones se liberan, provocando la fragmentación de la roca. Gracias a ello, los guijarros obtenidos en el río resultan excelentes martillos para dar forma y desbastar los sillares.

Los canteros incas emplearon, al parecer, martillos de diferentes tamaños durante las diversas fases de conformación de los sillares. En mi búsqueda por las canteras encontré tres grupos distintos de martillos. El primero comprende los que pesan entre 8 y 10 kilogramos. En el segundo se agrupan los que pesan de 2 a 5 kilogramos y al tercero pertenecen los que tienen un peso inferior al kilo. Considero que cada grupo tuvo un uso específico. Los de mayor tamaño pudieron servir para el duro trabajo de escuadrar los bloques después de ser extraídos de la cantera. La mayoría de los bloques inacabados muestran marcas similares a las encontradas en las herramientas de piedra, pero de mayor tamaño. Tales marcas son, probablemente, el resultado de golpearlos con el gran martillo que sirve para escuadrarlos. Los martillos de tamaño mediano pudieron haber servido para desbastar las distintas caras de los sillares, debiendo haberse empleado los más pequeños para perfilar los bordes.

Para llegar a la conclusión de que éste fue el procedimiento seguido por los canteros incas, tuve que pasar de la teoría a la práctica. El blanco de mi experimento fue un bloque en bruto de andesita que medía aproximadamente 25 × 25 × 30 centímetros. Con un martillo que pesaba alrededor de los 4 kilogramos, golpeé sobre las principales protuberancias para obtener un sillar en bruto. Con unos seis golpes fue suficiente. El siguiente objetivo era alisar una de las seis caras del sillar rectangular. Para ello seleccioné otro martillo de cuatro kilos y empecé a golpear. Se podría pensar que manejar un martillo de cuatro kilos durante algún tiempo puede resultar muy cansado. Pero la gravedad facilita el trabajo. Sosteniendo el martillo levemente, entre las manos, se puede dejarlo caer sobre la superficie del sillar sin dificultad. Si el martillo golpea sobre la andesita se produce un rebote de unos 15 o 25 centímetros, lo que permite volver a golpearla. El proceso puede repetirse durante bastante tiempo y con poco esfuerzo.

Cortar la piedra de este modo es, esencialmente, machacarla. Sin embargo, si el martillo es dirigido en ángulo de 15 o 20 grados sobre la perpendicular de la superficie, se desprenden minúsculas lascas y la talla se acelera. Yo descubrí que la eficacia del golpe aumentaba efectuando un giro de la muñeca con el martillo, justo antes de dejarlo caer sobre la superficie del sillar. Girando las muñecas aumenta el ángulo de impacto entre 40 y 45 grados de la perpendicular [*véase la figura 5*]. El mecanismo por el que se gana en efectividad al aumentar el ángulo es bastante conocido. Cuando el martillo se dirige verticalmente, la fuerza total del golpe se convierte en compresión que resquebraja la roca. Por el contrario, si el golpe se desvía de la vertical, produce un efecto de cizalla, adicional a la fuerza de compresión. Tal efecto aumenta con el ángulo del golpe, pues se desprenden pequeñas lascas que aceleran la labor de talla.

Pulida ya una de las seis caras del sillar, el cantero debe cambiar su técnica. Si a aquél sólo se le da la vuelta y se usa el mismo martillo para cortar una nueva cara, podrían desprenderse grandes lascas en los bordes de la nueva cara con los golpes del martillo grande. Para evitarlo, el cantero debe tomar otro martillo menor y dedicarse a esbozar los bordes de la nueva cara, antes de pulir la zona central de la misma. Para esta operación utilicé un martillo de unos 560 gramos de peso. El método difiere bastante del empleado para cortar la superficie. En vez de golpear la superficie del sillar más o menos verticalmente, el martillo rebajaba los bordes. La gravedad interviene poco en la tarea de formar los bordes del sillar. El martillo de 560 gramos es demasiado pequeño para rebotar después de cada golpe, por eso debe sostenerse firmemente, ya que la fuerza del golpe procede exclusivamente del brazo del cantero.

Una vez que los bordes se han esbozado puede darse la vuelta al sillar. Se deja el martillo pequeño y el cantero

toma de nuevo el más pesado para desbastar la nueva cara. En el sillar empleado para mi experimento desbasté dos caras después de la primera, utilizando varios martillos más, que tenían un peso de 3,5 o 4 kilogramos. El proceso completo, la extracción del sillar, la formación de cinco bordes y el acabado de tres caras, no me ocupó más de noventa minutos. Mi experimento demostró que el extraer las piedras, cortarlas y pulirlas empleando herramientas sencillas es una operación que dura poco tiempo y requiere escaso esfuerzo. El siguiente problema es saber si éstos fueron realmente los métodos utilizados por los incas.

Hay numerosos datos de que los incas emplearon técnicas similares a las mías. En los sillares de todos los muros incas, independientemente del tipo de piedra, se encuentran señales parecidas a las que yo dejé al golpear el sillar en el que experimenté. Si el sillar es de caliza hay una manifiesta decoloración en los alrededores de dicha señal. Los puntos blancos indican evidentemente una metamorfosis parcial de la caliza, debido al calor generado por el impacto del martillo pétreo. En cada uno de los sillares que examiné, las señales eran más pequeñas hacia los bordes que en el centro de los mismos, lo cual pone de manifiesto que los martillos empleados para trabajar aquéllos eran menores que los utilizados en el centro de las caras. Lo que corrobora, por otro lado, el comentarista coetáneo Garcilaso de la Vega, conocido como el Inca. Este personaje, hijo de un conquistador y de una princesa inca, escribía en 1609 que los incas "no tenían otras herramientas para trabajar las piedras que otras piedras negras... con las que ellos desbastan los sillares más golpeando que cortando".

Quizás el aspecto más intrigante de todos no sea el de la extracción y desbastado de los grandes sillares, sino el método empleado para ajustarlos con tanta precisión. Las juntas de los sillares son de dos tipos principales, las horizontales y las verticales. Aquellas permiten trasladar el peso de un sillar a toda la hilada inferior o a uno solo de sus sillares. Las verticales no transmiten ningún peso o, en último caso, muy poco. Por eso me dediqué especialmente a las juntas horizontales.



6. DESMONTANDO EL MURO de Ollantaytambo se averigua cómo los incas ajustaban los sillares. Cada zona cóncava indica el lugar en que se ha quitado un sillar. El rehundimiento se realizó para ensamblar con precisión el saliente convexo existente en la superficie inferior del sillar de la hilada superior.

Después de examinar muchos muros incas llegué a la conclusión de que, cuando se construían, la junta horizontal de una misma hilada venía determinada por la hilada inferior. Los sillares solían ofrecer sus caras ligeramente convexas, razón por la que se rehundía la superficie de los sillares superiores a la hora de ajustarlos con los inferiores. En cualquier lugar en que exista un muro desmontado se pueden apreciar las depresiones de las hiladas existentes, dando la impresión de que las hiladas desaparecidas han dejado una clara huella de su cara inferior [*véase la figura 6*]. Estos rehundimientos contradicen una hipótesis bastante frecuente sobre la cantería inca, según la cual esos grandes sillares se frotarían entre sí para alcanzar una unión perfecta. Es evidente que frotando dos superficies entre sí no se obtienen las perfectas uniones cóncavo-convexas que he observado. Entonces, ¿cómo consiguieron una unión tan perfecta?

Como en el desbastado de los sillares, intenté averiguarlo aprendiendo a hacerlo yo mismo. El experimento lo realicé con el sillar de andesita que yo había trabajado y con un gran sillar cuya junta horizontal estaba lista para realizarse. Comencé poniendo el sillar pequeño sobre el grande y trazando sobre él su esquema. Retiré aquél y, empleando el esquema como guía, golpeé sobre la superficie señalada por la cara inferior del sillar pequeño. El golpe produjo mucho polvo, que tuve que eliminar. El polvo es molesto porque amortigua los golpes del martillo, pero es también útil. Cuando el sillar superior se coloca de nuevo en su posición, deja una impresión de su cara inferior sobre dicho polvo. Este se comprime en la zona en que la unión es más estrecha, mientras permanece suelto en donde aquella es más holgada. Repitiendo el proceso se puede lograr una unión tan estrecha como se quiera.

La misma técnica se puede utilizar para las juntas laterales. El nuevo sillar a agregar a la hilada es situado casi en su emplazamiento, realizándose entonces los rehundimientos del sillar. Las juntas laterales se diferencian de las horizontales en que la perfecta unión observada al ver el muro frontalmente sólo tiene unos cuantos centímetros de profundidad, realizándose la unión en la zona más profunda mediante cascote. Sin embargo, en muchas ocasio-

nes las uniones laterales están tan cuidadas como las horizontales a lo largo del plano de juntura.

Parece que la técnica inca para ajustar los sillares se basaba en la ley de ensayo y error. Es un método laborioso, especialmente si se considera el tamaño de los grandes bloques de Sacsayhuamán y Ollantaytambo. Pero debe tenerse en cuenta que tiempo y mano de obra fueron conceptos de poca importancia para los incas, ajenos a la noción europea de tiempo y disponían, gracias a sus conquistas, de abundante mano de obra. Aún más, mis experimentos demuestran que con un poco de práctica se desarrolla una habilidad especial para resolver las uniones superficiales, con lo que el tiempo que se precisa para realizar las uniones se reduce considerablemente. Mis métodos, para los que empleé sólo las herramientas de las que había pruebas, funcionan y están basados, además, en al menos dos escritores del siglo XVI. Uno de ellos, José de Acosta, un sacerdote jesuita que viajó junto con los conquistadores y que es considerado como observador fiable, escribía en 1589: "Todo esto fue hecho con mucha mano de obra y con grandes sufrimientos; para lograr el ajuste entre las piedras hubo que efectuar muchos intentos."

Creo que mis experimentos ofrecen una considerable cantidad de información sobre el método seguido por los incas para extraer, dar forma y ajustar los sillares. Sin embargo, no he podido explicar por completo el método utilizado para transportar los sillares a pie de obra y para manejarlos.

Un papel importante en esta operación desempeñaron una serie de protuberancias existentes en las superficies de los sillares. Estas tenían diversas formas y tamaños [*véase la figura 8*]. Generalmente se encuentran en la parte inferior de los sillares que están colocados en su emplazamiento. Estas protuberancias pueden haber servido para atar cuerdas o para utilizar palancas. Estos salientes al parecer se eliminaron sólo a pie de obra y tenían por función exclusiva facilitar el acarreo de los sillares hasta aquel lugar. Sin embargo, ninguno de los sillares abandonados a lo largo de las rutas de transporte tienen salientes, por lo que no deben haberse usado durante su traslado hasta pie de obra.

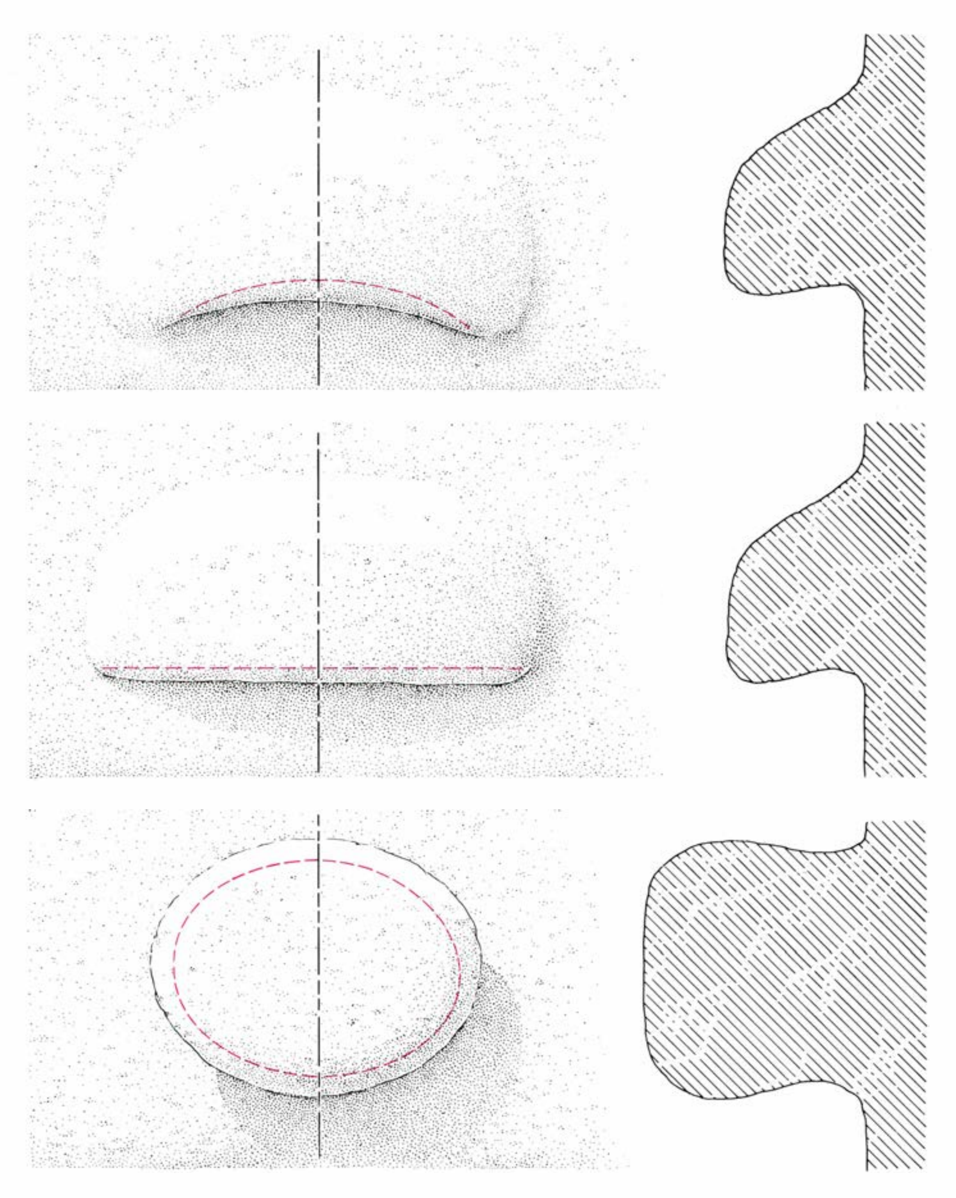
¿Cómo se transportaron estos sillares? Alguna información al respecto ofrecen los sillares dispersos por los alrededores de Ollantaytambo. En ellos se observan unas peculiares marcas pulidas, que son más o menos paralelas a las estrías longitudinales. Las mismas parecen resultado de llevar los sillares desde las canteras hasta pie de obra. La dirección en que los sillares fueron arrastrados puede determinarse con facilidad basándose en las marcas. Si se observan de cerca las superficies, se descubren unas zonas de forma irregular que no están pulidas por hallarse ligeramente rehundidas. Esas zonas presentan generalmente un extremo afilado y otro más romo. Aquél aparece en el frente y éste en la parte trasera de los sillares que han sufrido arrastres. La grava existente en el lecho del camino de arrastre se acumularía en los rehundimientos y alisaría la zona del borde delantero.



7. MARCAS DE ARRASTRE en la superficie inferior de un sillar de Ollantaytambo. Sugieren que algunos bloques se llevaron a pie de obra arrastrándolos sobre el pavimento de grava de los caminos incas. Se pueden analizar las marcas para encontrar la dirección en que se arrastró el sillar. Por ejemplo, el rehundimiento circular (*en el centro, a la izquierda*) está claramente definido en el lado izquierdo, mientras aparece muy romo en el lado derecho. Cuando se arrastraba el sillar, la grava se alojó en el rehundimiento bajo el borde frontal, que resultó afilado. Cuando la grava alcanzó el fondo del rehundimiento, quedó comprimida entre el lecho del camino y el borde final de la superficie hundida, que resultó pulido y romo. De tales razonamientos se deduce que el sillar de la fotografía fue arrastrado hacia la izquierda. (Fotografía del autor.)

Otro detalle evidente en los sillares puede ayudarnos a obtener una imagen más exacta del proceso de transporte. El pulido sólo se encuentra en las caras más anchas de los sillares, lo que sugiere que las piedras se arrastraron en su posición más estable. Los sillares encontrados en la cantera carecen de pulido, mientras que la proporción de las superficies pulidas aumenta en los situados a mayor distancia de la misma. La existencia de tales superficies pulimentadas permite considerar como equivocada la opinión de que los incas transportaban sus grandes sillares sobre rodillos. La presencia de señales de arrastre no elimina la posibilidad de que los rodillos se emplearan en las pendientes de las rampas, pero no se han encontrado pruebas materiales de tales instrumentos.

Si los sillares fueron arrastrados a lo largo de las rampas, los incas debieron contar para ello con una considerable mano de obra, especialmente cuando se trataba de bloques ciclópeos. La fuerza requerida para arrastrar un sillar depende del coeficiente de rozamiento existente entre la piedra y el material del que está constituida la rampa, de la pendiente de la misma y del peso del sillar. Gracias a mis experimentos averigüé el coeficiente de fricción y medí la pendiente de la rampa de Ollantaytambo, que era de unos diez grados. El mayor sillar de Ollantaytambo pesa alrededor de 140.000 kilos. Después calculé que sería necesario una fuerza de unos 120.400 kilogramos para arrastrar un sillar de tales características hasta lo alto de la rampa. Considerando que un hombre puede aportar una fuerza constante de 50 kilos, cantidad tal vez excesiva, serían necesarios unos 2400 hombres para llevar el sillar hasta la cima de la rampa. Tal cifra está de acuerdo, al menos en su magnitud, con el relato del escritor del siglo XVI Cieza de León, quien señalaba que de los 20.000 hombres asignados a la construcción de Sacsayhuamán, 6000 se



8. LAS PROTUBERANCIAS DE LOS SILLARES INCAS: adoptan diversas formas, obedeciendo sin duda a funciones específicas. El primer tipo (*arriba*) se adapta bien al empleo de palancas; el ilustrado abajo, pudo usarse para atar cuerdas. Un tercer tipo (*en el centro*) pudo servir, a su vez, para ambas funciones.

destinaban a las operaciones de transporte.

El relato parece concluyente; sin embargo, aún existen aspectos muy significativos a los que no he sido capaz de dar una solución adecuada. Las rampas incas tenían sólo unos seis u ocho metros de anchura y no me ha sido posible aportar respuestas plausibles a los dos problemas que se derivan de su estrechez. Uno de ellos es cómo fue posible situar a 2000 hombres o más para que cada uno de ellos contribuyese de manera efectiva a arrastrar los sillares. El otro es cómo se organizaba tal gentío en un camino tan estrecho. Estos son solamente dos de los problemas sin resolver concernientes al transporte de los bloques.

Entre los problemas de otra naturaleza se encuentran los referentes a las técnicas utilizadas para atar las cuerdas a los sillares y a los métodos empleados para manejar los enormes bloques.

Además, los sillares de Rumicolca no fueron probablemente arrastrados en su totalidad. En contraposición a los de Kachicata, estos de Rumicolca fueron cuidadosamente desbastados antes de abandonar la cantera. No se han encontrado en ellos marcas de arrastre y no parece razonable pensar que la finura de desbastado de sus caras pudiera ser realizada por las piedras de la rampa. ¿Cómo se transportaban pues estos sillares desbastados? Esta y otras muchas cuestiones aún deben ser resueltas antes de que se pueda escribir la obra definitiva sobre las técnicas incas. Pero gracias a los trabajos de experimentación y a la observación atenta, algunos aspectos fundamentales sobre la extracción, desbastado y ajuste han quedado aclarados.

Astronomía islámica

Mientras la astronomía se marchitaba en la Europa medieval, florecía en el Islam. Los astrónomos del Renacimiento aprendieron en los textos de los sabios musulmanes, los cuales habían conservado y transformado la ciencia griega

Owen Gingerich

Los historiadores que estudian el desarrollo de la astronomía desde la Antigüedad hasta el Renacimiento denominan, a veces, período islámico al comprendido entre el siglo VIII y el siglo XIV. Durante este intervalo la mayor parte de la actividad astronómica tuvo lugar en el Oriente medio, norte de Africa y España musulmana. Mientras Europa languidecía durante estos siglos oscuros, la antorcha del conocimiento de la Antigüedad había sido transmitida a manos musulmanas. Los sabios del Islam la mantuvieron encendida y la transmitieron, a su vez, a la Europa del Renacimiento.

Dos circunstancias promovieron el desarrollo de la astronomía en tierras del Islam. Una de ellas fue la proximidad geográfica a los grandes centros culturales de la Antigüedad, así como la tolerancia que el Islam ejerció con sabios y eruditos pertenecientes a otras confesiones religiosas. A principios del siglo IX se había traducido al árabe la mayor parte de los textos científicos griegos, incluida la *Sintaxis* de Ptolomeo, obra en la que la astronomía antigua alcanzó su cénit. Las obras griegas fueron, más tarde, conocidas en la Europa medieval precisamente gracias a estas traducciones: de hecho la *Sintaxis* se conoce, aún hoy, por su título árabe, *Almagesto*, que significa "la mayor".

El segundo aliciente para este desarrollo procedió de las prácticas religiosas musulmanas, que planteaban gran número de problemas relacionados con la astronomía matemática y que, en su mayoría, se referían a cuestiones relativas a la determinación del tiempo. Para resolver tales problemas, los científicos musulmanes fueron mucho más allá de los métodos matemáticos griegos. Estas novedades, sobre todo en el campo de la trigonometría, proporcionaron las herramientas esenciales para la creación de la astronomía del Renacimiento.

Los rastros que nos ha dejado la astronomía islámica medieval resultan visibles todavía hoy. Un astrónomo actual utiliza palabras de origen árabe cuando se refiere al cénit, al acimut o al álgebra o cuando menciona las estrellas del triángulo de verano (Vega, Altair, Deneb). No obstante, aunque conocemos bastante bien la historia de la transmisión de la astronomía griega al mundo árabe, no ocurre lo mismo con la de su reelaboración a manos de los científicos musulmanes y su retransmisión subsiguiente al Occidente latino: se trata de una etapa cuya historia se está empezando a escribir ahora. Quedan por examinar millares de manuscritos. No obstante, puede ofrecerse un esquema fragmentario del proceso.

La Casa de la Sabiduría

Los fundamentos de la ciencia islámica en general, y de la astronomía de modo particular, se colocaron dos siglos después de la emigración del profeta Mahoma desde La Meca hasta Medina en el año 622 de nuestra era. Este acontecimiento, que recibe el nombre de Hégira, marca el punto de partida del calendario musulmán. Los primeros siglos del Islam se caracterizan por una expansión rápida y turbulenta del Imperio. Hasta fines del siglo II y principios del III de la Hégira no surgió una atmósfera suficientemente cosmopolita y estable que permitiera el florecimiento de las ciencias. En este momento, la nueva dinastía abbasí, que se había apoderado del Califato (nombre que recibía la institución que asumía el liderazgo político en el Islam) en el año 750 y que fundó Bagdad, su nueva capital, en el año 762, empezó a promover traducciones de textos griegos. En unas pocas décadas se tradujeron al árabe las grandes obras científicas de la Antigüedad, entre las que se incluían las de Galeno, Aristóteles, Euclides, Ptolomeo, Arquímedes y Apolonio. Esta labor fue realizada tanto por eruditos cristianos y paganos como por sabios musulmanes.

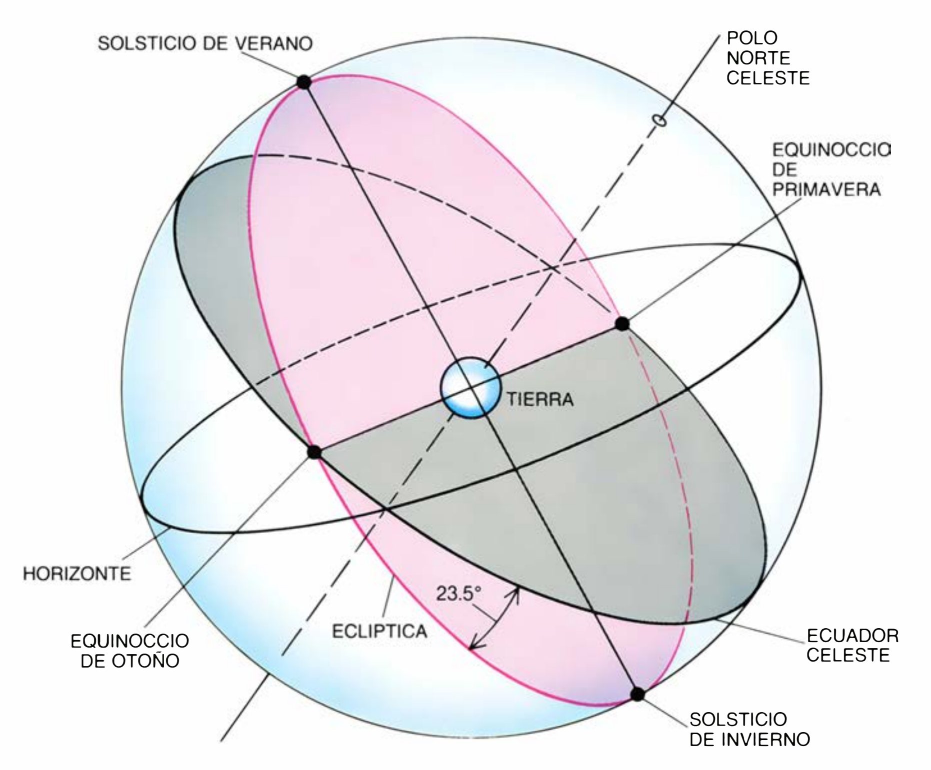
El más vigoroso promotor de este esfuerzo fue el califa al-Ma'mún, que llegó al poder en el año 813. Al-Ma'mún fundó una academia denominada Casa de la Sabiduría y puso a su frente a Hunayn ibn Ishaq al- ᶜIbadi, un cristiano nestoriano que dominaba el griego. Hunayn se convirtió en el más célebre de todos los traductores de textos griegos. Llevó a cabo traducciones árabes de Platón, Aristóteles y de sus comentaristas, y tradujo las obras de los tres fundadores de la medicina griega: Hipócrates, Galeno y Dioscórides.

El principal traductor de la academia en lo relativo a los textos matemáticos y astronómicos fue un pagano llamado Thábit ibn Qurra. Thábit era, en un principio, un cambista de moneda en el mercado de Harrán, situada al norte de Mesopotamia, que era el centro de un culto religioso astral. Mantenía de manera resuelta que los fieles seguidores de este culto habían sido los primeros en cultivar la tierra, fundar ciudades, construir puertos y descubrir la ciencia, a pesar de lo cual fue tolerado en la capital del Islam, donde escribió más de un centenar de obras científicas entre las que se incluía un comentario al *Almagesto* de Ptolomeo.

Otro astrónomo matemático que trabajó en la Casa de la Sabiduría fue al-Jwarizmí, cuya *Algebra*, dedicada a al-Ma'mún, puede haber sido el primer tratado sobre esta disciplina que se escribió en árabe. Aunque esta obra no constituye un logro científico de pri-

1. MAPA ESTELAR de la constelación de Perseo en una copia islámica medieval de un dibujo realizado en el siglo X por el astrónomo persa ᶜAbd al-Rahmán al-Sufi. Al-Sufi revisó el catálogo de estrellas que Ptolomeo, el astrónomo más importante de la Antigüedad, había llevado a cabo en el siglo II de nuestra era. La figura forma parte de un manuscrito conservado en la Biblioteca Nacional de El Cairo.


صورت برساوس چنانکه در کره است



2. ESFERA CELESTE que gira en torno a la tierra, concebida por los astrónomos de la Antigüedad para explicar los movimientos del sol y de las estrellas. Sus polos y su ecuador son el resultado de proyectar, en el firmamento, los polos y el ecuador terrestres. A medida que la esfera gira, diariamente, sobre su eje de este a oeste, el sol y las estrellas se mueven también en torno a los polos sobre círculos concéntricos. El sol se mueve algo más despacio que las estrellas y, por consiguiente, a lo largo de un año describe, sobre la esfera celeste, una órbita circular hacia el este que recibe el nombre de eclíptica. En los equinoccios, el sol cruza el ecuador celeste; en los solsticios se encuentra unos 23,5 grados por encima o por debajo del ecuador. Un observador situado sobre la tierra ve la mitad de la esfera celeste que se halla sobre el horizonte.

mera categoría, ayudó a introducir métodos hindúes y griegos en el mundo islámico. Algo después del año 1100 de nuestra era, fue traducida al latín por un inglés, Roberto de Chester, que se había desplazado a España con el fin de estudiar matemáticas. La traducción, que empezaba con las palabras *Dicit Algoritmi* (de ahí procede el término moderno "algoritmo"), tuvo una gran influencia en el álgebra occidental durante la Edad Media.

Por otra parte, su influencia se deja sentir aún en todo el conjunto de la matemática y de la ciencia ya que marcó la introducción en Europa de los "numerales árabes". Junto con ciertos procedimientos trigonométricos, los árabes tomaron de la India un sistema de numeración que incluía el cero. Los numerales indios adoptaron dos formas distintas en el mundo islámico, de las cuales la llamada forma occidental fue transmitida, a través de España, a la Europa medieval. Estos numerales, con el cero explícito, resultan mucho más cómodos que los números romanos para realizar cálculos.

Otro astrónomo activo en la Bagdad del siglo IX fue Ahmad al-Fargani. Su obra astronómica más importante fueron sus *Djawámi*^{c} o *Elementos*, que contribuyeron a difundir las partes más elementales y no matemáticas de la astronomía geocéntrica ptolemaica. Los *Elementos* tuvieron una influencia considerable en el Occidente europeo. Fueron traducidos al latín dos veces en Toledo: la primera por Juan de Sevilla (Johannes Hispalensis), en la primera mitad del siglo XII, y unas pocas décadas más tarde por Gerardo de Cremona, que llevó a cabo su labor de manera más completa.

La traducción de la astronomía de al-Fargani realizada por Gerardo proporcionó a Dante lo fundamental de sus conocimientos sobre astronomía ptolemaica: en la *Divina Comedia* el poeta asciende a través de las esferas planetarias cuyo centro coincide con el de la tierra. No obstante, la versión anterior, debida a Juan de Sevilla, fue la que adquirió una mayor difusión en el Occidente latino. Constituye el fundamento de la *Esfera de Sacrobosco*, una exposición sobre astronomía esférica aún más diluida, escrita a principios del siglo XIII por John de Holywood (Johannes de Sacrobosco). La *Esfera de Sacrobosco* se convirtió en un libro de texto utilizadísimo en todas las universidades de la cristiandad occidental. Tras la invención de la imprenta, fue objeto de más de doscientas ediciones hasta ser superada, a principios del siglo XVII, por otros manuales. De ningún otro libro de texto podemos decir que haya sido utilizado durante tanto tiempo si exceptuamos los *Elementos* de Euclides.

De este modo surgieron de la Casa de la Sabiduría de la antigua Bagdad, gracias a su tolerancia de tono amable y a su mezcla única de culturas, no sólo una serie impresionante de traducciones de obras científicas y filosóficas griegas sino también comentarios y tratados originales. Hacia el año 900 de nuestra era se habían puesto los fundamentos para que se produjera el florecimiento de una ciencia internacional que utilizaba un único vehículo lingüístico: el árabe.

El impulso religioso

El desarrollo de la astronomía en el Islam recibió un impulso de la mayor trascendencia de las estipulaciones establecidas en el culto religioso musulmán, que planteaban toda una serie de problemas de astronomía matemática y especialmente de geometría esférica.

En tiempos de Mahoma, tanto cristianos como judíos observaban ciertas festividades, como la Pascua, cuya fecha se determinaba en función de las fases de la luna. Ambas comunidades habían afrontado el hecho de que los meses lunares de 29,5 días, aproximadamente, no eran comensurables con el año solar de 365 días: doce meses lunares constan sólo de 354 días. Para resolver este problema, cristianos y judíos habían adoptado un esquema basado en un descubrimiento realizado, hacia el año 430 a. de C., por el astrónomo ateniense Metón. El ciclo metónico de 19 años comprendía 12 años de 12 meses lunares y siete años de 13 meses lunares. La intercalación periódica de un décimotercer mes permitía que las fechas del calendario se mantuvieran, dentro de ciertos márgenes, de acuerdo con las estaciones.

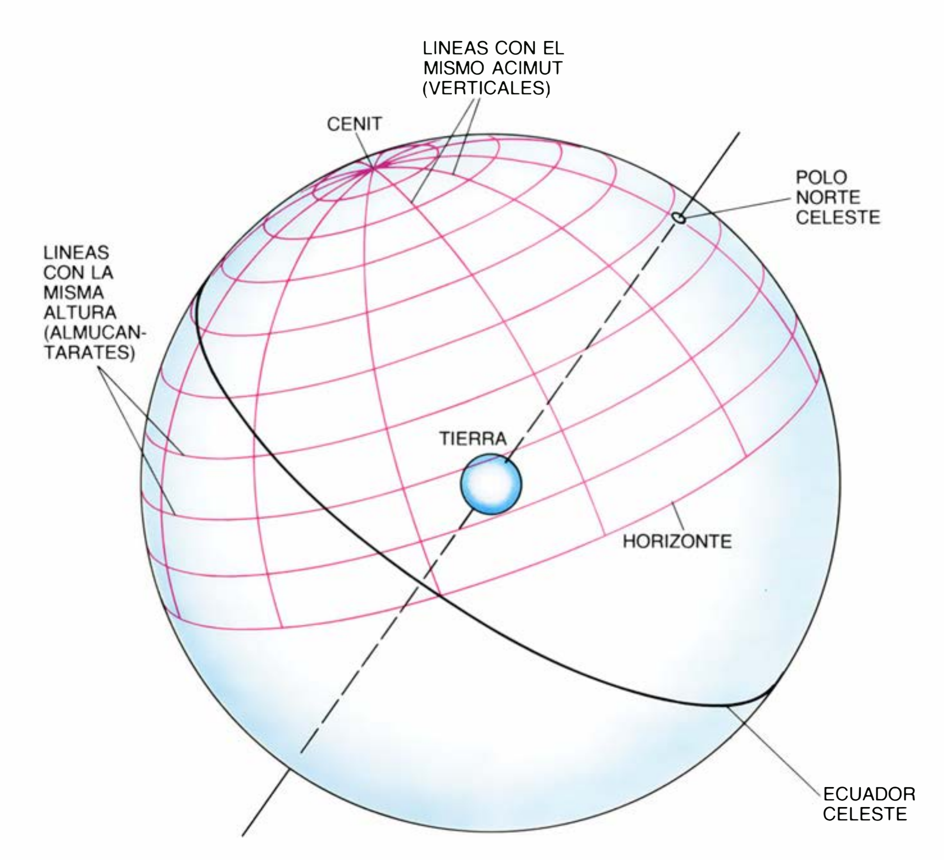
Pese a ello, es probable que el esquema habitual no se siguiera en todas las jurisdicciones y que gobernantes poco escrupulosos añadieran a veces el 13º mes intercalar cuando favorecía sus intereses. Mahoma consideró esto como una obra del demonio y, por ello, decretó en el *Corán* (9,36): "El número de meses junto a Dios es de doce. Así está en el Libro de Dios desde el día en que creó los cielos y la tierra. Cuatro son sagrados: Esa es la religión permanente". [Traducción de J. Vernet.] El califa ^{c}Umar I (634-644) interpretó

que este decreto exigía un calendario lunar estricto, que es el que se sigue hasta ahora en la mayor parte de los países musulmanes. Dado que el año hegiriano es unos 11 días más breve que el año solar, las festividades musulmanas como el Ramadán, el mes del ayuno, retroceden lentamente a lo largo de todas las estaciones, y recorren un ciclo completo en unos 30 años solares.

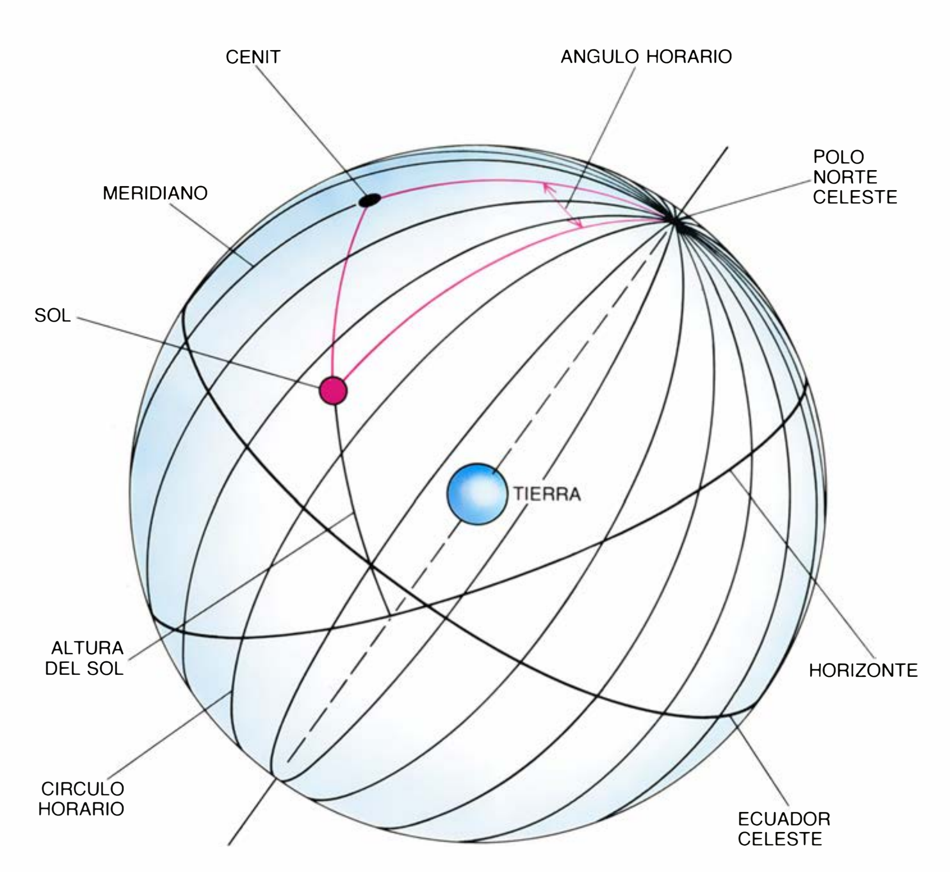
Por otra parte el Ramadán, al igual que los restantes meses islámicos, no empieza cuando se produce la luna nueva astronómica, definida como el momento en que la luna tiene la misma longitud celeste que el sol, razón por la cual resulta invisible. El comienzo del mes se produce cuando la delgada franja de la luna creciente se ve, por vez primera, al anochecer en el horizonte occidental. Los astrónomos matemáticos musulmanes tuvieron que hacer frente al reto de poder predecir en qué preciso momento la luna creciente resultaría visible. Aunque la teoría ptolemaica sobre el complejo movimiento de la luna resultaba tolerablemente ajustada en las proximidades de la luna nueva, sólo especificaba el recorrido de la luna con respecto a la eclíptica (el plano de la órbita solar sobre la esfera celeste). Para predecir la primera visibilidad de la luna era preciso describir su movimiento con respecto al horizonte, y la solución a este problema requería la aplicación de una geometría esférica bastante refinada.

Otras dos prácticas religiosas implicaban cuestiones cuya solución exigía asimismo la aplicación de la geometría esférica. Uno de estos problemas era el de la determinación de la dirección de La Meca desde una localidad determinada, dado que los musulmanes estaban obligados a rezar cara a la ciudad santa y a orientar sus mezquitas en la misma dirección. La segunda de estas cuestiones exigía determinar, en función de la posición de los cuerpos celestes, los momentos adecuados para las oraciones canónicas diarias que deben realizarse al alba, poco después del mediodía, por la tarde, durante el crepúsculo vespertino y cuando ya es noche cerrada.

La solución de cualquiera de estos problemas implica encontrar los lados o ángulos desconocidos de un triángulo situado sobre la esfera celeste en función de los lados o ángulos conocidos. Una manera de determinar la hora del día, por ejemplo, es construir un triángulo cuyos vértices son el cénit, el polo norte celeste y la posición del sol. El observador debe conocer la altura del



3. COORDENADAS HORIZONTALES; constituyen un procedimiento de estructurar el hemisferio celeste visible para una determinada latitud. El cielo se divide mediante líneas de la misma altura sobre el horizonte y por líneas que tienen el mismo acimut en torno a dicho horizonte. Estas últimas convergen hacia el cénit.



4. RESOLVER TRIANGULOS ESFERICOS constituyó la tarea clave de muchos problemas con los que se enfrentaron los musulmanes. Para determinar la hora en función de la altura del sol, tenían que hallar el ángulo horario formado, en el polo norte celeste, por el meridiano (círculo máximo que pasa por el cénit y los polos) y por el círculo horario del sol (círculo máximo que pasa por el sol y los polos). A mediodía, cuando el sol cruza el meridiano, su altura alcanza el valor máximo correspondiente al día y su ángulo horario es cero.

sol y la del polo: puede observar la primera y la segunda es igual a la latitud del observador. El ángulo formado en la intersección del meridiano (el arco que pasa por el cénit y el polo) con el círculo horario del sol (el arco que conecta el sol con el polo) nos dará la hora.

El procedimiento utilizado por Ptolomeo para resolver triángulos esféricos resultaba un tanto torpe y había sido ideado a fines del siglo I de nuestra era por Menelao de Alejandría. Partía de dos triángulos rectángulos que se intersecan: al aplicar el teorema de Menelao, podía conocerse uno de los seis lados sólo si eran conocidos los otros cinco. Para determinar la hora en función de la altura del sol, por ejemplo, se requerían aplicaciones repetidas del teorema de Menelao. Por esta razón, los astrónomos musulmanes se vieron enfrentados a un claro reto para encontrar un método trigonométrico más sencillo.

En el siglo IX se habían definido ya las seis funciones trigonométricas modernas: seno y coseno, tangente y cotangente, secante y cosecante. La única función trigonométrica conocida, en cambio, por Ptolomeo era la cuerda. De las seis, cinco parecen ser esencialmente de origen árabe y sólo la función seno fue introducida en la cultura islámica desde la India. La etimología de la palabra "seno" resulta, en sí misma, interesante. La palabra sánscrita era *ardhadjya*, que significa "media cuerda", término que en árabe se abrevió y transliteró como *djyb*. En un momento difícil de determinar, la palabra *djyb* fue confundida con el término árabe *djayb* que significa "bolsillo" o "golfo", ya que, en árabe, las vocales no se escriben. En la Europa Medieval este término se tradujo por *sinus*, la palabra latina que significa golfo. A partir del siglo IX, el desarrollo de la trigonometría esférica resultó rápido. Los astrónomos musulmanes descubrieron igualdades trigonométricas simples, entre las que se contaban la ley de los senos, que facilitaron y agilizaron los procedimientos para resolver triángulos esféricos.

Estrellas y astrolabios

Los nombres de las estrellas constituyen uno de los ejemplos más claros de lo que la astronomía moderna debe a la herencia islámica. Betelgeuse, Rigel, Vega, Aldebarán y Fomalhaut son algunos de los topónimos estelares cuyo origen es árabe de manera directa o deriva de traducciones árabes de las descripciones realizadas en griego por Ptolomeo.

Ptolomeo introdujo en el *Almagesto* un catálogo de más de mil estrellas. La primera revisión crítica del catálogo fue llevada a cabo por ᶜAbd al-Rahmán al-Sufi, astrónomo persa del siglo X que trabajó en el Irán y en Bagdad. El *Kitab suwar al-kawakib* ("Libro sobre las Constelaciones de las Estrellas Fijas") de al-Sufi no añadió ni suprimió estrellas de la lista del *Almagesto*, ni tampoco estableció nuevas determinaciones de la posición que ocupan en el catálogo ptolemaico, frecuentemente erróneo, pero proporcionó mejores magnitudes e identificó, a veces, sus nombres árabes. Los topónimos estelares utilizados por él eran, en su mayoría, simples traducciones de Ptolomeo.

Durante muchos años se tuvo la convicción de que la nomenclatura estelar utilizada en Occidente derivaba de la obra de al-Sufi. Hoy, en cambio, se cree que sus traductores de los siglos XIV y XV recurrieron a una traducción latina de la versión árabe del mismo *Almagesto* en lo que se refiere a las descripciones de las estrellas que combinaron, por otra parte, con las magníficas representaciones pictóricas de los manuscritos de al-Sufi. Mientras tanto, la toponimia estelar árabe se introducía lentamente en el Occidente europeo por otro camino: la manufactura de astrolabios.

El astrolabio fue un invento griego. En lo esencial se trata de un modelo del cielo en dos dimensiones, un calculador analógico para resolver problemas de astronomía esférica.

Un astrolabio típico consta de una serie de láminas de latón que se insertan en una matriz, también de latón, que en árabe recibe el nombre de *umm* ("madre"). La lámina superior, denominada *ᶜankabut* ("araña") y en latín



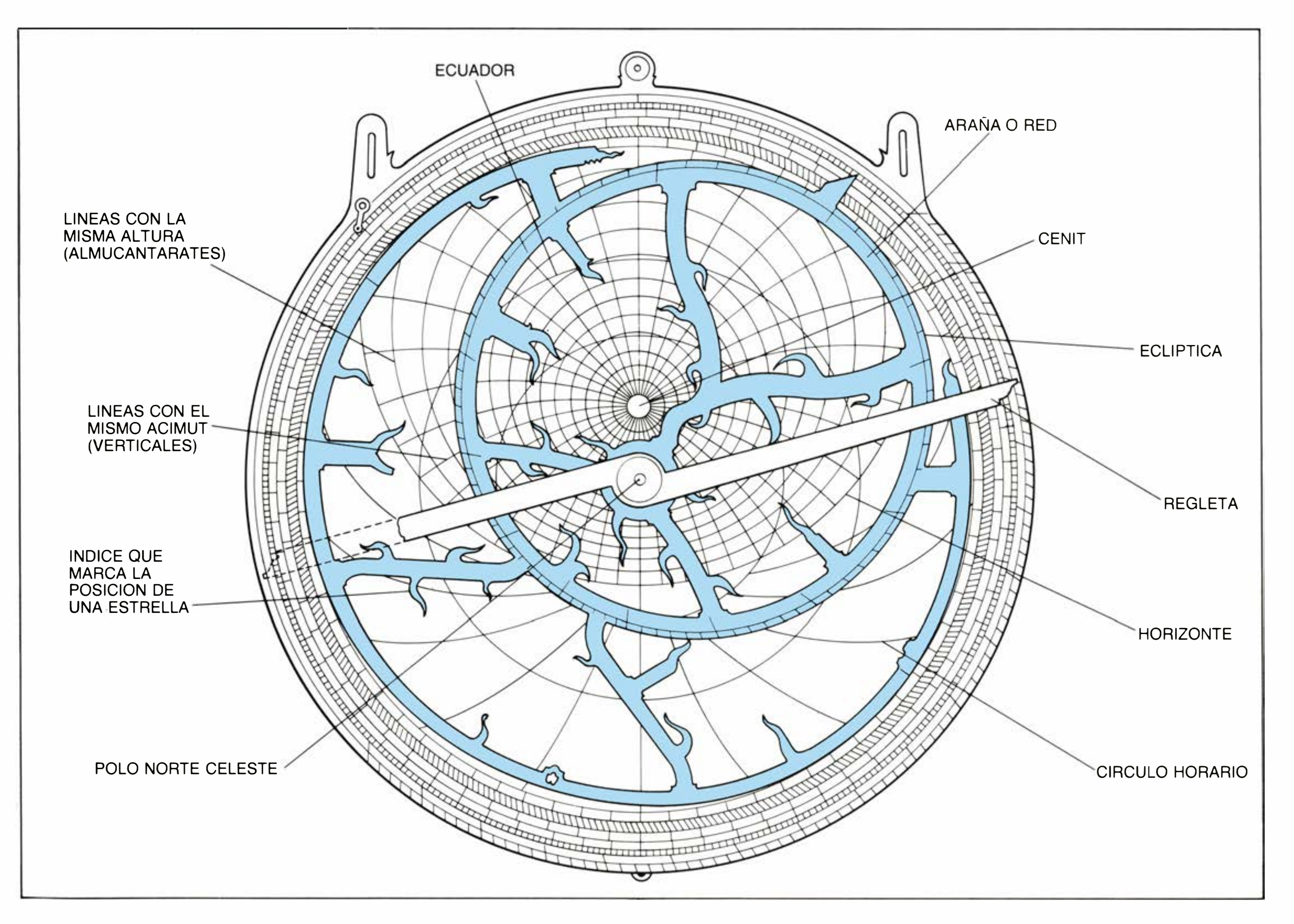
5. EL ASTROLABIO simplificaba los cálculos astronómicos entre los que se encontraba la determinación de la hora. Sus láminas de latón introducidas dentro de la *madre* son una proyección de la esfera celeste en dos dimensiones. La lámina superior, llamada *araña*, es una red abierta de índices que marcan la posición de algunas estrellas prominentes. El círculo excéntrico situado sobre la araña es la eclíptica. Bajo la araña se encuentra una lámina sólida sobre la que se ha grabado un sistema de coordenadas celestes correspondiente a una latitud determinada: líneas de la misma altura, líneas del mismo acimut y círculos horarios. Al girar

rete, consiste en una red abierta con dos o tres docenas de índices que indican las posiciones de ciertas estrellas específicas. Bajo la red se encuentran una o varias láminas sólidas que llevan grabado un sistema de coordenadas celestes apto para realizar observaciones en una determinada latitud: almucantarates o círculos de la misma altura sobre el horizonte (análogos a los paralelos de latitud terrestre) y círculos verticales con el mismo acimut en torno al horizonte (análogos a los meridianos de longitud terrestre). Con este instrumento podemos representar el movimiento diurno de las estrellas en la esfera celeste haciendo que la red gire en torno a una clavija central que representa el polo norte celeste.

Aunque el astrolabio fuera conocido en la antigüedad, el instrumento más antiguo que conservamos remonta a la etapa islámica. Fue construido por un hombre llamado Nastulus en el año 315 de la Hégira (927-928 de J.C.) y constituye, hoy en día, uno de los tesoros más apreciados del Museo Nacional de Kuwait [véase *la portada*]. Sólo existe un número reducido de astrolabios árabes del siglo X, mientras que conservamos unos cuarenta de los siglos XI y XII. Varios de estos últimos fueron fabricados en España a mediados del siglo XI y tienen un estilo "morisco" característico.

El tratado árabe sobre el astrolabio más antiguo conservado fue escrito en Bagdad por ᶜAli ibn ᶜIsà, uno de los astrónomos de al-Ma'mún. Otros miembros posteriores de la escuela de Bagdad, al-Fargani entre ellos, escribieron también sobre el astrolabio. El tratado de al-Fargani causó sensación por los procedimientos matemáticos utilizados para aplicar el instrumento a numerosos problemas de astrología, astronomía y cuestiones relativas a la medida del tiempo.

Muchos de estos tratados llegaron hasta España, donde fueron traducidos al latín en los siglos XII y XIII. El más popular de todos ellos, del que conservamos, actualmente, unas doscientas copias manuscritas, se ha atribuido durante mucho tiempo a Masha'allah, astrónomo judío que participó en la decisión de fundar Bagdad. Probablemente se trata de un pastiche tardío derivado de múltiples fuentes. Hacia 1390 este texto constituyó la base del libro sobre el astrolabio escrito por el poeta inglés Geoffrey Chaucer. Inglaterra aparece, de hecho, como la puerta por la que el astrolabio penetró desde España al occidente cristiano a fines del siglo XIII y durante el siglo XIV. La actividad científica que se centraba en Oxford en esta época pudo haber contribuido al desarrollo del interés por este instrumento. De cualquier modo, los *colleges* Merton y Oriel de la Universidad de Oxford conservan, aún



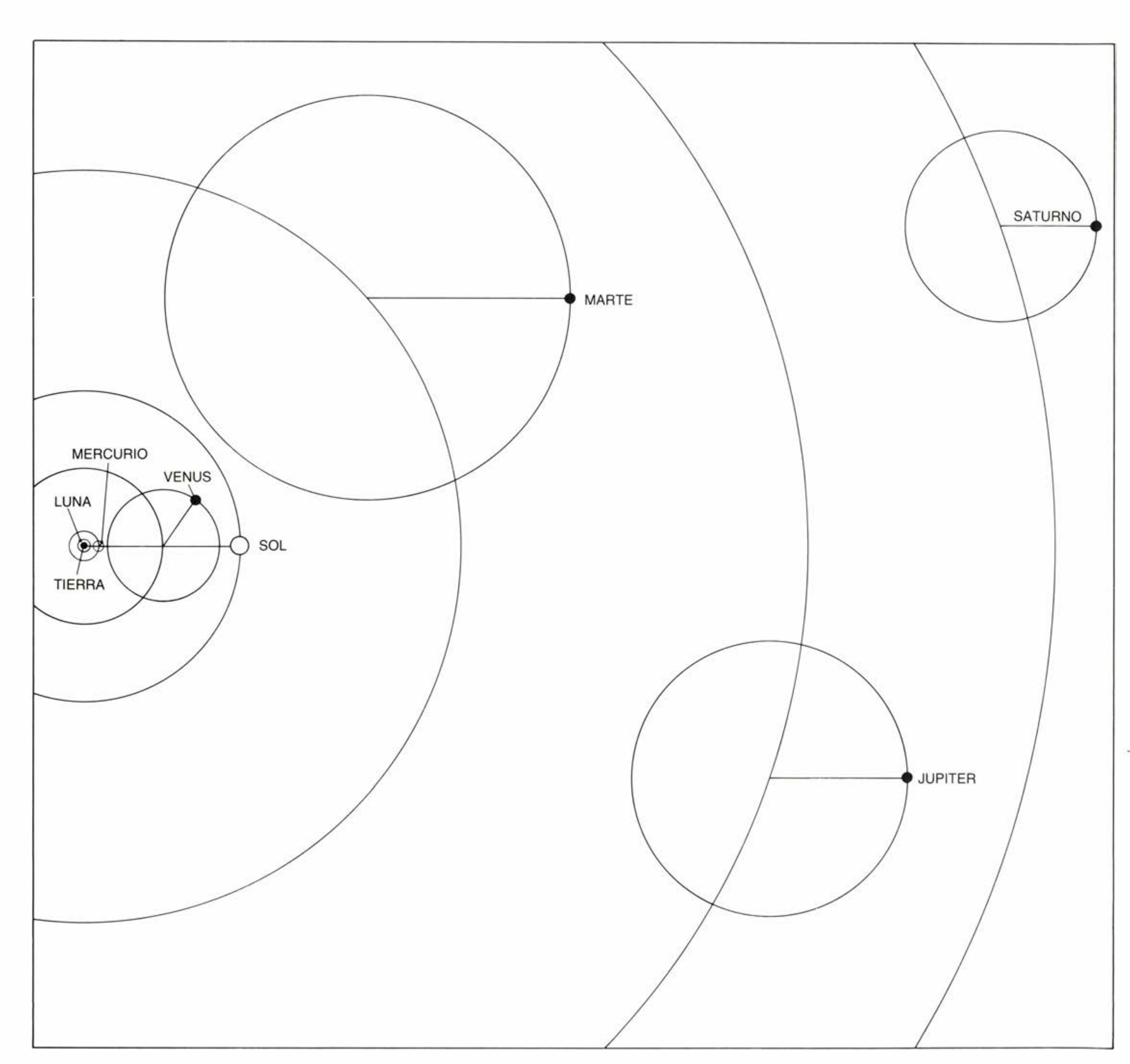
la araña en torno al pivote central, que representa el polo norte celeste, se podía reproducir el movimiento diario de las estrellas. El primer paso para determinar la hora era establecer la altura del sol (o de una estrella) mediante una alidada de pínulas y una escala graduada situadas en el dorso del astrolabio. A continuación se hacía girar la araña hasta que la posición del sol sobre la eclíptica (o el índice correspondiente a una estrella) coincidía con el círculo de altura correcto. El ángulo horario lo daba, entonces, el ángulo formado en el pivote central entre la línea meridiana y una línea que pasara por la posición del objeto. El astrolabio que se muestra aquí fue fabricado en Inglaterra en el siglo XIII y se conserva en el Merton College de Oxford. Los astrolabios constituyeron la vía principal a través de la cual la toponimia estelar árabe fue transmitida a Occidente. En la fotografía pueden leerse nombres como *Vega* y *Rigil*.

hoy, magníficos ejemplares de astrolabios del siglo XIV.

En ellos pueden encontrarse las típicas colecciones de nombres árabes de estrellas escritos en letras latinas góticas. En el astrolabio del Merton College aparecen topónimos árabes que se utilizan, todavía hoy, dentro de la terminología moderna habitual: Vega, Altair, Algeuze, Rigil, Elfeta, Alferaz y Mirac [*véase la figura 5*]. Por consiguiente, como resultado de la tradición astrolábica originada en el Islam oriental y transmitida, a través de España, a Inglaterra, la mayor parte de las estrellas que, aún hoy, se utilizan en la navegación, llevan nombres árabes, sean éstos indígenas o traducciones árabes de las descripciones griegas de Ptolomeo.

Refinar a Ptolomeo

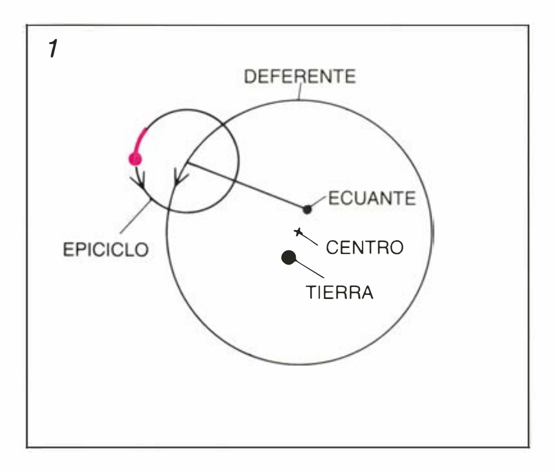
Sería incorrecto concluir, dada la preponderancia de topónimos estelares árabes, que los astrónomos musulmanes estudiaron el cielo de manera exhaustiva. Sus observaciones, por el contrario, fueron bastante reducidas en número. Un ejemplo: la espectacular supernova (explosión estelar) del año 1054, que dio lugar a la formación de la nebulosa del Cangrejo, pasó casi inadvertida en las fuentes árabes, a pesar de haber sido profusamente registrada en la China. Los astrónomos modernos, al sorprenderse por este espectacular vacío de información, no suelen darse cuenta de que los astrónomos musulmanes no registraron *la mayor parte* de los fenómenos astronómicos específicos. Tenían pocos motivos para

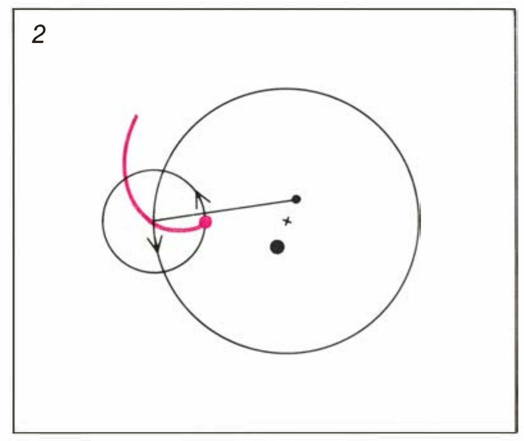


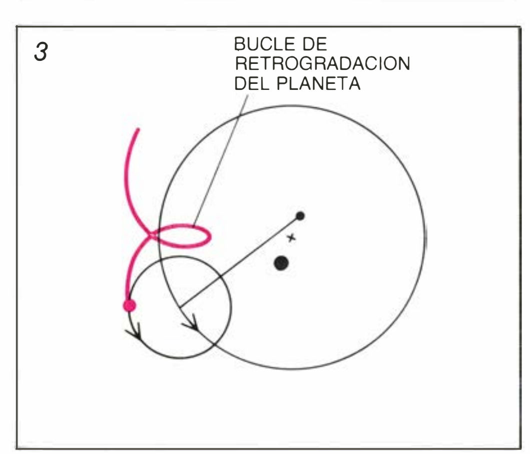
6. EL SISTEMA PTOLEMAICO situaba el sol, la luna y los planetas en órbitas en torno a la tierra. La luna y los cinco planetas conocidos se desplazaban sobre círculos auxiliares, denominados epiciclos, cuyos centros se movían, a su vez, sobre círculos mayores llamados deferentes. Los epiciclos reproducían el movimiento aparente retrógrado de los planetas (*derecha*). La velocidad orbital de un planeta, por otra parte, es variable incluso cuando no retrograda. Con el fin de representar este movimiento no uniforme, Ptolomeo adoptó dos dispositivos geométricos más. En primer lugar, hizo que sus deferentes fueran excéntricos, es decir, que desplazó sus centros con respecto a la tierra. Por otra parte, admitía que el movimiento angular del centro del epiciclo de un planeta era uniforme en

tomarlos en consideración. Su astrología, al contrario de la de los chinos, no dependía tanto de presagios celestes poco corrientes como de las posiciones planetarias, y estas últimas estaban suficientemente bien descritas por los procedimientos ptolemaicos.

En los modelos planetarios diseñados por Ptolomeo en el siglo II de nuestra era, el sol, la luna y los planetas giraban en torno a la tierra. No obstante, una simple órbita circular no puede justificar el hecho de que un planeta, de forma periódica, parece cambiar el sentido de su movimiento a través del cielo (este movimiento aparentemente retrógrado tiene lugar, según la moderna teoría heliocéntrica, cuando la tierra adelanta a un planeta o es adelantada por él en su órbita en torno al sol). Por este motivo Ptolomeo hizo que cada planeta se moviera sobre un epiciclo, un pequeño círculo que giraba mientras que su centro, a su vez, se movía en torno a la tierra sobre un gran círculo denominado deferente. El epiciclo, conjuntamente con otros artificios geométricos inventados por Ptolomeo, proporcionó una primera aproximación bastante buena al movimiento aparente de los planetas. Como gran teórico que era, Ptolomeo se debió sentir muy seguro de la geometría peculiar de sus modelos ya que nunca explica de qué modo optó por ellos.







torno al ecuante, un punto situado a una distancia del centro del deferente igual a la que hay entre éste y la tierra, pero situado al otro lado de ésta con respecto al centro del deferente. Algunos astrónomos objetaron la necesidad de ecuantes y deferentes.

Por otra parte, la idea de aplicar la matemática a una descripción numérica específica del mundo físico debió significar una cierta novedad para los griegos del período helenístico, así como algo totalmente distinto de la matemática pura de Euclides y Apolonio. En esta fase de su programa, Ptolomeo se dio cuenta de que mejorar los parámetros numéricos de sus modelos era algo tan necesario como inevitable, ya que dio instrucciones muy cuidadosas sobre el procedimiento a seguir para establecer tales parámetros a partir de un número limitado de observaciones seleccionadas. Los astrónomos musulmanes aprendieron muy bien esta lección y limitaron sus observaciones, por lo menos aquellas que registraron por escrito, fundamentalmente a las mediciones que podían utilizarse para derivar de nuevo los parámetros clave. Estas observaciones incluían la orientación y la excentricidad de la órbita solar y la inclinación del plano de la eclíptica.

Como ejemplo muy notable de astrónomo musulmán que trabajó estrictamente dentro de un marco ptolemaico, pero que estableció nuevos valores para los parámetros ptolemaicos, podemos citar a Muhammad al-Battani, contemporáneo de Thábit ibn Qurra aunque más joven que éste. Su *Zidj* ("Tablas astronómicas") es objeto de admiración aún hoy, ya que se la considera una de las obras astronómicas más importantes del período comprendido entre Ptolomeo y Copérnico. Entre otras cosas, al-Battani pudo establecer la posición de la órbita solar (algo equivalente, en términos modernos, a encontrar la posición de la órbita terrestre) con mayor fortuna que Ptolomeo. Dado que al-Battani no describe con detalle sus observaciones, no está claro si adoptó, o no, una estrategia diferente de la de Ptolomeo en la planificación de éstas. En cualquier caso obtuvo buenos resultados y, varios siglos más tarde, sus parámetros de la órbita solar se encontraban ampliamente difundidos por Europa. Su *Zidj* empezó por abrirse camino hasta España donde, a principios del siglo XII, fue traducido al latín y, algo más de cien años después, al castellano. El hecho de que sólo conservemos un manuscrito árabe de esta obra (en la Biblioteca del Monasterio de El Escorial, cerca de Madrid) nos sugiere que la astronomía de al-Battani no fue tan cotizada en los países islámicos como en Europa, donde la invención de la imprenta aseguró su supervivencia y, de manera especial, la puso a disposición de Copérnico y de sus contemporáneos. El astrónomo polaco cita, en el *De Revolutionibus*, a su predecesor del siglo IX no menos de veintitrés veces.

Por el contrario, uno de los mayores astrónomos del Islam medieval, ᶜAli ibn ᶜAbd al-Rahmán Ibn Yunus, no fue, en modo alguno, conocido por los astrónomos europeos del Renacimiento. Trabajó en El Cairo un siglo después de al-Battani y escribió un gran manual astronómico titulado *Zidj Hakimí*. Contrariamente a lo que es habitual en otros astrónomos árabes, escribió un prefacio para su *zidj* que contiene referencias a una serie de más de cien observaciones que, en su mayoría, eran eclipses y conjunciones planetarias. Aunque el manual de Ibn Yunus fue ampliamente utilizado en los países musulmanes y sus tablas para la determinación de tiempos se usaban en El Cairo todavía en el siglo pasado, la labor de Ibn Yunus no fue conocida en Occidente hasta hace menos de doscientos años.

Dudas sobre Ptolomeo

A lo largo de todo el período islámico los astrónomos musulmanes se mantuvieron cautelosamente dentro del marco ptolemaico. Esta actitud no debiera ser objeto de críticas demasiado duras ya que, hasta que Galileo llevó a cabo sus observaciones telescópicas de las fases de Venus en 1610, no podía aducirse evidencia alguna, basada en observaciones, en contra del sistema ptolemaico. Ni siquiera las observaciones de Galileo permitían distinguir entre el sistema geo-heliocéntrico de Tycho Brahe (en el que los otros planetas giraban en torno al sol pero éste lo hacía alrededor de la tierra) y el sistema puramente heliocéntrico de Copérnico [véase "El caso Ga-

وهذه صورة افلاك القمر وهي مدارات مراكز الاكر التامة على حسب ما تصور على البسط لاقامة البراهين
وحساب التعاديل على انا صورنا فلك التدوير والمدير في ثمانية اماكن وتلك الاماكن هي الاجتماع والاستقبال
والتربيعين و
لتسهل تصور ذلك

الاجتماع
محدب المايل
منطقة المايل
مقعر المايل
مركز العالم
الربع
الربع
الاستقبال

وتسعمائه رج له ن وحركة وسط القمر في عشرين سنة فارسية ب رمطمح ىا
وفي سنة واحدة دط ىح ب كط كه وفي ثلاثين يوما اه برل لونوح ط وفي يوم بليلته
له الخ لوح بور وفي ساعة مستوية لب تو كز لح ما لا وكتبنا ان
خاصة القمر للتاريخ المذكور دح لـ كر وحركتها في عشرين سنة فارسية ماد كب لـ
وفي سنة واحدة ـ ع محر وفي شهر اا لوح وفي يوم ح ز توو في ساعة لب
لهمه واثبتنا وسط الجوزهر للتاريخ المذكور ط ه رله وحركته الى خلاف التوالي في كل عشرين
سنة

lileo", por Owen Gingerich, INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, octubre de 1982]. Por otra parte, aunque los astrónomos musulmanes siguieron las recomendaciones de Ptolomeo de que comprobaran la validez de sus resultados, no se limitaron, simplemente, a mejorar sus parámetros. Los detalles técnicos de sus modelos no resultaban inmunes a toda crítica y fueron objeto de ataques por su parte. No obstante, estos ataques se basaban en consideraciones filosóficas y no en pruebas obtenidas gracias a la observación.

Los modelos de Ptolomeo constituían, esencialmente, un sistema matemático para predecir posiciones planetarias. No obstante, en sus *Hipótesis Planetarias*, Ptolomeo trató de adaptar sus modelos a un sistema cosmológico, el esquema aristotélico consistente en esferas introducidas una dentro de otra sin dejar espacios vacíos y con centro común en la tierra. Situó el punto de la órbita de Mercurio más próximo a la tierra (*perigeo*) inmediatamente más allá del punto de la órbita lunar situado en la posición más alejada de la tierra (*apogeo*); del mismo modo, el perigeo de Venus estaba situado inmediatamente más allá del apogeo de Mercurio, y así sucesivamente con las esferas del sol, Marte, Júpiter y Saturno.

Sin embargo, Ptolomeo, al pretender reproducir los movimientos no uniformes de los planetas que habían sido observados, se vio obligado a adoptar dos artificios puramente geométricos además del propio del epiciclo. En primer lugar desplazó el centro de sus círculos deferentes con respecto a la tierra. Por otra parte, adoptó la ingeniosa suposición de que el movimiento de los cuerpos celestes no era uniforme en torno a la tierra ni en torno a los centros de sus deferentes, sino alrededor de un punto, denominado ecuante, que se encontraba en una posición opuesta a la de la tierra con respecto al centro del deferente y a una distancia de éste igual a la existente entre el mencionado centro y la tierra. Los deferentes excéntricos y los ecuantes resultaron funcionales a la hora de representar las velocidades variables con las que se ve que los planetas cruzan el firmamento. No obstante, para algunos, tales artificios resultaban ofensivos desde un punto de vista filosófico.

7. SISTEMA DE DOBLE EPICICLO propuesto en el siglo XIV por Ibn al-Shátir; eliminaba los ecuantes ptolemaicos y situaba al sol, la luna y los planetas en órbitas concéntricas en torno a la tierra. Este diagrama, de un manuscrito de la Biblioteca Bodleyana de Oxford, muestra varias posiciones de la luna.

El ecuante, de manera particular, suscitó reparos por parte de los filósofos que consideraban que las esferas planetarias eran objetos físico reales, que cada una de ellas era movida por la esfera inmediatamente superior y que la última esfera, a su vez, era arrastrada por el primer motor. Estos pensadores deseaban poder construir un modelo mecánico del sistema. Por ejemplo, tal como señaló Maimónides, sabio judío del siglo XII que trabajó en España y en El Cairo, el punto ecuante de Saturno se encontraba dentro de la esfera de Mercurio. Resultaba claramente difícil de concebir un modelo mecánico con un diseño de esta índole. El ecuante, además, violaba la noción filosófica de que los cuerpos celestes deben moverse gracias a un sistema de círculos perfectos, cada uno de los cuales giraría con velocidad angular uniforme en torno a su centro. Ni siquiera los deferentes excéntricos de Ptolomeo que desplazaban a la tierra del centro de todas las cosas eran considerados filosóficamente satisfactorios por algunos puristas.

Los astrónomos musulmanes adoptaron la cosmología ptolemaico-aristotélica pero, con el transcurso del tiempo, surgieron críticas. Uno de los primeros críticos fue Ibn al-Haytham (Alhazén), físico de primera categoría que trabajó en El Cairo en el siglo XI. En sus *Dudas sobre Ptolomeo* se quejaba de que el ecuante no satisfacía el requisito de un movimiento circular uniforme y llegaba hasta declarar falsos los modelos planetarios del *Almagesto*.

Sólo una de las obras astronómicas de Ibn al-Haytham, el libro titulado *Sobre la configuración del mundo*, alcanzó la Europa latina en la Edad Media. En él trató de descubrir la realidad física subyacente en los modelos matemáticos de Ptolomeo. Al concebir los cielos como un conjunto de esferas huecas concéntricas, trató de asignar un único cuerpo esférico a cada uno de los movimientos simples del *Almagesto*. Esta obra fue traducida al castellano en la corte de Alfonso X el Sabio y, a principios del siglo XIV, del castellano al latín. Esta versión o una traducción latina de uno de los divulgadores de Ibn al-Haytham tuvo una gran influencia en Europa a principios del Renacimiento. La idea de asignar una esfera celeste independiente a cada componente de los movimientos planetarios de Ptolomeo ganó gran aceptación a través de un libro de texto, las *Theoricae novae planetarum*, escrito hacia 1454 por el profesor vienés Georg Peurbach.

Mientras tanto, en el siglo XII y en el extremo occidental del Islam, Al-Andalus, el astrónomo y filósofo Ibn Rushd (Averroes) procedía de manera gradual hacia una crítica más severa de Ptolomeo. "Afirmar la existencia de una esfera excéntrica o epicíclica resulta contrario a la naturaleza." Añadía: "La astronomía de nuestro tiempo no ofrece verdad alguna, limitándose a conformarse con los cálculos y no con lo que existe en realidad." Averroes rechazaba los deferentes excéntricos de Ptolomeo y argumentaba en favor de un modelo estrictamente concéntrico para el universo.

Un contemporáneo suyo andalusí, Abu Ishaq al-Bitrudjí, llevó a cabo un esfuerzo para construir, efectivamente, un modelo de tales características. Los resultados fueron desastrosos. Por ejemplo, en el sistema de al-Bitrudjí, Saturno podía llegar a desviarse 26 grados con respecto a la eclíptica, en lugar de los tres grados que cabría esperar. En lo que respecta a los movimientos planetarios cuya observación llevó a Ptolomeo a proponer el ecuante, simplemente se ignoran en la obra del astrónomo andalusí. En boca de un comentarista moderno, al-Bitrudjí "amontona el caos sobre la confusión". No obstante, a principios del siglo XIII su obra fue traducida al latín y su nombre transformado en Alpetragius; desde 1230, aproximadamente, sus ideas fueron ampliamente discutidas a lo largo de toda Europa. Incluso Copérnico cita su orden de los planetas que situaba a Venus más allá del sol.

La escuela de Maraga

En el otro extremo del mundo islámico Nasir al-Din al-Tusi iniciaba, en el siglo XIII, una crítica de nuevo cuño de los mecanismos ptolemaicos. Este autor es uno de los polígrafos musulmanes más prolíficos ya que se le conocen 150 tratados y epístolas, y, por otra parte, construyó un observatorio importante en Maraga (actualmente Maragheh, al noroeste del Irán).

Al-Tusi tenía serias objeciones en contra del ecuante. En su *Tadhkira* ("Memorandum") lo sustituyó por la adición de dos pequeños epiciclos más al modelo correspondiente a la órbita de cada plantea. Gracias a este ingenioso artilugio al-Tusi logró lo que se proponía: generar movimientos no uniformes de los planetas combinando círculos que giraran con velocidad uniforme. No obstante, los centros de sus deferentes seguían desplazados con respecto a la tierra. Esta excentricidad,

filosóficamente objetable, se mantenía asimismo en una disposición alternativa diseñada por otros dos astrónomos del observatorio de Maraga, Mu'ayyad al-Din al-ᶜUrdi y Qutb al-Din al-Shirazi.

Finalmente Ibn al-Shátir, que trabajó en Damasco hacia 1350, logró una disposición totalmente concéntrica de los mecanismos planetarios. Utilizando un esquema relacionado con el de al-Tusi, Ibn al-Shátir consiguió no sólo eliminar el ecuante sino también prescindir de otros círculos criticables en las construcciones ptolemaicas. Preparó, por consiguiente, el camino para la estructuración de un sistema de esferas celestes dispuestas una dentro de otra que resultara, asimismo, aceptable desde un punto de vista mecánico. El mismo describe su trabajo con estas palabras: "He encontrado que los astrónomos recientes más distinguidos han aducido dudas indiscutibles relativas a la astronomía de las esferas según Ptolomeo, que es bien conocida. Por ello rogué al Dios Todopoderoso que me inspirara y ayudara a inventar modelos con los que pudiera lograrse lo que de ellos se requería, y Dios –alabado y ensalzado sea– me capacitó para diseñar modelos universales para los movimientos planetarios en longitud y latitud así como para todas las características restantes de sus movimientos, modelos que se encuentran libres de las dudas que afectan a sus predecesores."

No obstante, la solución de Ibn al-Shátir no fue conocida de manera general en la Europa medieval, como tampoco lo fue la obra de los astrónomos de Maraga.

¿Influencia sobre Copérnico?

El modelo olvidado de Ibn al-Shátir fue redescubierto a fines de la década de los años cincuenta por E. S. Kennedy y sus discípulos en la Universidad Americana de Beirut. El descubrimiento planteó una cuestión sumamente interesante. Se llegó pronto a la conclusión de que los mecanismos utilizados por Ibn al-Shátir y por los astrónomos de Maraga eran del mismo tipo que los que usó Copérnico unos pocos siglos más tarde con el fin de eliminar el ecuante y generar cambios complicados en la posición de la órbita terrestre. La disposición copernicana era, desde luego, geocéntrica, pero el problema de justificar los cambios lentos, pero regulares, de la velocidad orbital de los planetas seguía siendo el mismo. Dado que Copérnico estaba de acuerdo con las objeciones filosóficas en contra del ecuante –al igual que algunos de sus predecesores musulmanes también creía, aparentemente, que los movimientos celestes eran arrastrados por esferas físicas y de naturaleza cristalina– trató, asimismo, de sustituir el dispositivo de Ptolomeo. En una obra previa al *De revolutionibus*, el *Commentariolus*, utilizó un modelo equivalente al de Ibn al-Shátir. Más tarde, en su libro fundamental, recurrió al uso de órbitas excéntricas, adoptando un modelo que era el equivalente heliocéntrico del que había sido desarrollado en Maraga.

¿Pudo Copérnico haber sido influido por los astrónomos de Maraga o por Ibn al-Shátir? Hasta el momento presente no se ha encontrado traducción latina alguna de estos trabajos o de cualquier obra en la que se describieran sus modelos. Cabe dentro de lo posible que Copérnico viera un manuscrito árabe mientras estudiaba en Italia (desde 1496 hasta 1503) y se lo hiciera traducir, pero esta hipótesis no resulta muy probable. Sabemos que una traducción griega de algunos de los materiales de al-Tusi llegaron a Roma en el siglo XV (muchos manuscritos griegos fueron llevados hacia el Oeste tras la caída de Constantinopla en 1453), pero no existe prueba alguna de que Copérnico lo viera.

Los eruditos presentan, en la actualidad, una disparidad de opiniones en torno al tema de si Copérnico fue influido por el mundo islámico o no a la hora de establecer su método para sustituir el ecuante. Creo que lo pudo inventar de manera independiente.

No obstante, la idea básica de criticar a Ptolomeo y eliminar el ecuante forma parte del clima de opinión que el Occidente latino heredó del Islam. Los astrónomos musulmanes se hubieran quedado asombrados, e incluso horrorizados, ante la revolución iniciada por Copérnico. A pesar de ello, los motivos de este último no eran enteramente distintos de los de sus predecesores. Al eliminar el ecuante e, incluso, al situar los planetas en órbita en torno al sol, Copérnico trataba, en parte, de formular un sistema que resultara funcional desde un punto de vista mecánico y que, por consiguiente, ofreciera no sólo una representación matemática sino también una explicación física de los movimientos planetarios. En un sentido profundo, trataba simplemente de reelaborar las implicaciones de una astronomía que, si bien había sido fundada por Ptolomeo, también había sido transformada por los astrónomos musulmanes. Hoy en día esta herencia pertenece al mundo científico en su totalidad.

Juegos de ordenador

El rey (un programa ajedrecístico) ha muerto, ¡viva el rey! (una máquina ajedrecística)

A. K. Dewdney

Si a CRAY BLITZ le fuera posible recordar algo más que jugadas de ajedrez, jamás olvidaría la velada del 15 de octubre de 1985. Es la última ronda del Campeonato Norteamericano de Ajedrez Computarizado, que se celebra durante la asamblea anual de la Asociación de Máquinas de Cómputo. En la parte delantera de un salón de reuniones del Hotel Radisson de Denver está reservado un espacio, ocupado por cinco mesas, separadas del público por una barrera. En cada mesa, frente a frente, dos equipos de programadores, con sus consejeros. A veces bromean; otras, sus rostros inexpresivos tratan de ocultar la procesión que va por dentro, la tensión de la espera, la incertidumbre. Detrás de cada mesa hay una pantalla, sobre la cual un proyector situado en lo alto arroja la imagen de un tablero ordinario.

Los protagonistas del torneo son los 10 aspirantes al título norteamericano. Sus nombres, extraños y angulosos, traicionan sus diferentes orígenes y aspiraciones: AWIT, BEBE, CHAOS, CRAY BLITZ, HITECH, INTELLIGENT SOFTWARE, LACHEX, OSTRICH, PHOENIX y SPOC [*véase la figura 1*]. Se echan a faltar tres de los grandes nombres que han dominado durante estos últimos años el ajedrez computarizado: BELLE, CHESS 4.7 y NUCHESS.

El interés se concentra casi exclusivamente en la final entre CRAY BLITZ y HITECH. Del lado HITECH de la mesa se encuentran Robert Hyatt, de la Universidad del Sur de Mississippi, Albert Gower, experto ajedrecista, de la misma institución, y Harry Nelson, del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore. Dándoles frente, Hans Berliner, de la Universidad Carnegie-Mellon, y Murray Campbell, uno de sus doctorandos, que es experto jugador. Berliner desempeña en el equipo HITECH el doble papel de consejero ajedrecístico y programador. El desarrollo del juego y la creciente tensión son motivo de que Berliner se levante con frecuencia de la mesa, con una sonrisa fatigada en el rostro. En una ocasión pasa junto a mi asiento y murmura, "¡Esto se parece mucho a mis viejos tiempos, cuando jugaba el campeonato americano!" (Durante varios años, a finales del decenio de 1950 y comienzos del siguiente, Berliner estuvo considerado entre los diez o doce mejores jugadores de los Estados Unidos.)

A diferencia del campeonato norteamericano, donde impera un silencio sepulcral, este torneo está lleno de animación, y no faltan en él risas ocasionales, el continuo repicar de los teclados y las incesantes observaciones que a través de la megafonía lanza el árbitro Michael Valvo, exultante consultor de informática y maestro internacional de ajedrez de Sedona, Arizona. "¡Floja jugada de las negras. El rey sigue excesivamente desprotegido y el doblete de peones de c5 y c6 entorpece aún la defensa." No lejos de él, un miembro del equipo CRAY BLITZ exclama, sin dirigirse a nadie en particular, "¡Es curioso, creí que iba a jugar rey a f3!". Un maestro internacional todavía detecta fallos en los programas ajedrecísticos, y los programas aún sorprenden a veces a sus creadores.

A lo largo de toda esta última ronda de la partida HITECH lleva una clara ventaja sobre su rival. Ya a principios del juego, CRAY BLITZ cayó en una encerrona, una posición crítica, de la cual toda concebible vía de escape comportaba una mala jugada o una pérdida de material. Ello obligó a CRAY BLITZ a estructurar sus peones de mala manera. HITECH sigue aún sacando partido de su ventaja.

Hacia la medianoche, la suerte está echada. Casi todas las partidas han terminado ya y todos los expertos pronostican la victoria de HITECH. El equipo de CRAY BLITZ solicita del juez Valvo permiso para abandonar. Valvo sugiere un par de jugadas más. Si para entonces la posición de CRAY BLITZ no ha mejorado, el equipo puede rendir la partida. La posición no mejora y abandonan. HITECH es ya el campeón norteamericano y, de hecho, rey mundial del ajedrez computarizado. Aunque oficialmente el campeón mundial siga siendo CRAY BLITZ (que ganó el título en 1983 y no tiene obligación de defenderlo hasta el próximo junio) la victoria de HITECH, sumada a sus otras tres victorias en torneos anteriores, resulta impresionante. Sin duda alguna HITECH es el más potente ordenador ajedrecístico del mundo.

Sonrisas y más conversación. ¿Hubieran sido otros los resultados de participar BELLE, CHESS 4.7 y NUCHESS? "Lástima que faltaran BELLE y los demás programas", comenta uno de los organizadores del campeonato, "pero no creo que el resultado hubiese sido muy diferente". A continuación señala que en lo tocante a las máquinas y programas presentados no existen diferencias de importancia entre los campeonatos norteamericano y mundial. La conversación deriva entonces hacia Kasparov y Karpov, y después, hacia la teoría. "No bromeo", afirma uno de los participantes, quien al parecer habla con autoridad, "Un programa que profundizase hasta 20 jugadas, atendiendo tan sólo al material, podría derrotar a cualquier gran maestro". Se suscita cierta controversia; algunos minutos más tarde la sala queda vacía. El campeonato norteamericano ha terminado.

El comentario sobre las 20 jugadas no carece de interés. El juego de ajedrez puede representarse mediante un grafo arbóreo inmenso, formado por nodos y líneas. Prefiero imaginar el árbol vuelto hacia abajo, con el nodo inicial, la raíz, en lo más alto. Cada nodo representa una de las posibles situaciones del juego, es decir, un tablero, en el cual las piezas y los peones han llegado a las casillas que ocupan tras una serie de jugadas lícitas. Un nodo estará

unido mediante una línea con un nodo situado en sentido descendente, siempre que el movimiento lícito de una pieza o peón convierta el tablero representado por el primer nodo en el tablero designado por el segundo. Cada posible partida de ajedrez puede identificarse con una determinada ruta de descenso por el árbol ajedrecístico, que parte del nodo raíz (en el cual todavía no se ha efectuado jugada alguna) y que concluye en algún nodo, en el cual de ordinario apenas si quedan piezas, y donde uno de los jugadores ha sufrido mate o se ha visto forzado al abandono.

Los programas ajedrecísticos se proponen explorar en el árbol de juego sólo una porción de partida tan pequeña como sea posible. El programa parte del nodo que representa la situación actual y examina todos los tableros descendentes inmediatos (profundidad 1); después, examina los descendientes de los descendientes (profundidad 2), y así sucesivamente. La profundidad media de las exploraciones se denomina profundidad de prospección o, brevemente, "prospectiva". Esta medida da cuenta, por sí sola, de casi todo lo que pudiéramos llamar "inteligencia" de un programa ajedrecístico. La parte menor emana de la evaluación que haga el programa de los tableros que constituyen el horizonte de su prospectiva. El programa analiza cada tablero y le asigna un valor numérico. Tal valor refleja en qué medida es deseable alcanzar tal posición. Merced a un procedimiento llamado "minimax", el programa hace que alguno de los valores así atribuidos se infiltre y ascienda por el árbol hasta llegar a los nodos del primer estrato. El nodo que alcance máximo valor corresponderá a la jugada a realizar.

Existe una curiosa transacción entre las dos componentes "de intelección" del programa. Cuanto mejor sea el plan de evaluación, tanto menos profundamente será necesario explorar el árbol de juego. Si el sistema de evaluación fuera perfecto, el programa no tendría necesidad de profundizar más allá del primer estrato. Recíprocamente, un programa con un sistema de evaluación rudimentario tendría que explorar hasta una gran profundidad para jugar eficazmente. ¿Hasta qué profundidad debe llegar una búsqueda que, atendiendo sólo al material, resulte eficaz contra un gran maestro? ¿Bastaría profundizar 20 niveles?

El título de gran maestro lo concede la Federación Internacional de Ajedrez a los jugadores que más se distingan en los torneos internacionales. (La federación no toma en consideración a los ordenadores.) De ordinario, los grandes maestros alcanzan puntuaciones superiores a 2400. Hasta la fecha del Campeonato Norteamericano de Ajedrez Computarizado, HITECH había jugado 21 partidas en torneos con humanos, alcanzado en ellos una puntuación de 2233. De este modo, HITECH se convertía en el ordenador ajedrecístico de más alta puntuación del mundo. Según Berliner, que en sus tiempos de jugador llegó a los 2443 puntos, la clasificación de HITECH ha ido subiendo, por término medio, a razón de unos 8 puntos por partida en los torneos nacionales. ¿Superará la máquina a su creador dentro de 14 partidas?

Cuanto antecede suscita la cuestión de lo buenos que pueden llegar a ser los ordenadores ajedrecísticos. ¿Llegará el día en que el mejor jugador del mundo sea un ordenador? David Levy, antiguo jugador y hoy autor y empresario, ha concretado la cuestión en una serie de apuestas. En 1968, Levy le apostó 500 libras esterlinas a John McCarthy, de la Universidad de Stanford, a que ningún ordenador lograría ganarle una partida de ajedrez en los siguientes diez años. Levy cobró sus ganancias en agosto de 1978, en la Feria Nacional de Muestras canadiense. Jugueteó en ella contra CHESS 4.5, un programa creado en la Universidad del Noroeste. Se renovó la apuesta inicial, fijándola en la cantidad de 6000 dólares para un período de otros seis años. En abril de 1984, Levy jugó desde Londres una partida telefónica contra CRAY BLITZ. Volvió a ganar.

La breve racha de suerte de Levy le ha envalentonado; desde Denver lanza el siguiente envite de 100.000 dólares: en el plazo de 10 años, a partir del lanzamiento de la apuesta, todo aspirante computarizado habrá sido derrotado por un humano seleccionado por Levy. Si encuentra quien le acepte el envite, es probable que se trate de un ordenador especializado, y no de un mero programa. Hasta la fecha, nadie ha recogido el guante.

Los dos mejor clasificados en el torneo norteamericano, HITECH y BEBE, eran en esencia máquinas especiales. Vale la pena destacar que un programa llamado INTELLIGENT SOFTWARE, presentado por el propio Levy, quedó tercero. Funciona en un Apple IIe, complementado tan sólo por una tarjeta de aceleración, que es una placa especial de circuito impreso que duplica la velocidad de funcionamiento de la máquina. Quizás Levy haya puesto a punto un sistema de evaluación muy superior a los existentes.

PROGRAMA	ORIGEN	ORDENADOR	LENGUAJE	TABLEROS POR SEGUNDO	PROFUNDIDAD DE PROSPECCION
AWIT	Universidad de Alberta	Amdahl 5860	Algol W	10	3 niveles
BEBE (segundo)	SYS-10 Inc., Hoffman Estates, Ill.	Especial	Ensamblador	20.000	7 niveles
CHAOS	Universidad de Michigan	Amdahl 5860	FORTRAN	70	4 niveles
CRAY BLITZ	Universidad del Sur de Mississippi	Cray X-MP 48	FORTRAN/ Ensamblador	100.000	8 niveles
HITECH (primero)	Universidad Carnegie-Mellon	Sun, provisto de pastillas VLSI a propósito	C	175.000	8 niveles
INTELLIGENT SOFTWARE (tercero)	Intelligent Software, Inc., Londres	Apple IIe con acelerador	Ensamblador	500	7 niveles
LACHEX	Laboratorio Nacional de Los Alamos	Cray X-MP 48	FORTRAN/ Ensamblador	50.000	7 niveles
OSTRICH	Universidad McGill	Red de siete Novas y un Eclipse	Ensamblador	1200	6 niveles
PHOENIX	Universidad de Alberta	Red de VAX 780 y de 10 Sun	C	540	6 niveles
SPOC	SDI/Cypress Software, San José, California	IBM PC	Ensamblador	300	5 niveles

1. Participantes en el Campeonato Norteamericano de Ajedrez Computarizado de 1985

Los *cognoscenti* ajedrecísticos que presenciaron el campeonato coinciden en afirmar que la mejor partida del torneo fue la jugada, durante la segunda ronda, entre CRAY BLITZ y BEBE, fruto este último de la iniciativa privada. Tony Scherzer, cuya compañía SYS-10 Inc. desarrolló y puso a punto BEBE, la ha presentado a numerosos torneos durante estos últimos años. BEBE no es un mero programa, sino una máquina ajedrecística por derecho propio. El juego no sólo revistió importancia por haber sido el más interesante del torneo, sino también porque fue la primera vez que CRAY BLITZ perdía una partida en tres años.

Los lectores pueden seguir en un tablero ordinario las 50 jugadas de la partida entre CRAY BLITZ y BEBE, que daremos inmediatamente. Las piezas se denotan con letras mayúsculas: R, rey; D, dama; A, alfil; C, caballo; T, torre. Los escaques se representan por coordenadas, formadas por una letra seguida de un número. Situemos el tablero en la posición normal, con un cuadro negro en el vértice inferior izquierdo; se rotulan entonces, a partir del ángulo inferior izquierdo, las columnas, de izquierda a derecha, con las letras *a* - *h* y, las filas, con los números 1 a 8. La descripción de las jugadas va desde la evidente Rb1 (rey a casilla b1) hasta la desconcertante Cf3 (caballo a f3). ¿Cuál de ellos? En esa jugada concreta, solamente uno de los caballos puede saltar a f3. Los movimientos de los peones se indican por la designación de una casilla, por ejemplo, e4. Los comentarios al juego son del árbitro, Michael Valvo.

	CRAY BLITZ (Blancas)	BEBE (Negras)
1.	e4	c5
2.	Cf3	d6
3.	d4	c x d4

(La x indica la captura de una pieza o peón.)

4.	C x d4	Cf6
5.	Cc3	g6
6.	Ag5	Ag7
7.	Dd2	Cc6
8.	0-0-0	0-0

BEBE

CRAY BLITZ

2. Aspecto del tablero tras la jugada 21

(Las blancas se enrocan por el lado de dama, enroque largo, y las negras por el lado de rey, enroque corto.)

9.	Cb3	Te8
10.	Ac4	Cg4

Las negras jugaron Cg4 con la intención de 11... Ac3 x C en la jugada siguiente. Deben haber creído las negras que a las blancas les es obligatorio 12 c3 x A, pero las negras cambian de opinión en la siguiente jugada de las blancas. Si A x c3, ¡entonces D x c3!; C x f2 falla si se lleva alguna de las torres a f1, mientras que A x f7, jaque, resultaría fatal.

11.	h3	Cge 6
12.	Ab5	a6
13.	Ae2	a5
14.	Ab5	Ae6
15.	Cd5	a4
16.	Cd4	Ad7

La situación de las blancas es desesperada. El peón negro (a4) amenaza con crear un punto débil en torno al rey blanco.

17.	C x c6	b x c6
18.	C x e7 jaque	T x e7
19.	A x e7	D x e7
20.	Ae2	De6
21.	Rb1	Tb8

(Llegados aquí, el tablero ofrece el aspecto que se muestra en la figura 2.) Las negras amenazan con 22... Tb2, jaque, seguido de 23 Rb2 Cc4, con jaque doble y ganancia de la dama blanca.

22.	b3	a x b3
23.	c x b3	Ae8
24.	Rc2	Cd7
25.	f3	Ta8
26.	Rc1	Cc5
27.	Dc2	Df6
28.	Ac4	Da1 jaque
29.	Rd2	D x a2

Una jugada más fuerte aún es 29... Ac3, jaque, ¡seguida de 30 Re2 Ta2!

30.	D x a2	T x a2 jaque
31.	Rc1	d5
32.	e x d5	c x d5
33.	A x d5	Ab5
34.	The1	Cd3 jaque

La ventaja de material de las negras, que era de una pieza, está a punto de acrecentarse en otro cambio. En partidas de campeonato entre humanos, las blancas probablemente pidieran el abandono en este punto.

35.	T x d3	A x d3
36.	Te8 jaque	Af8
37.	g4	Rg7
38.	Te3	Aa3 jaque
39.	Rd1	Ta1 jaque
40.	Rd2	Af1
41.	Rc3	Tc1 jaque
42.	Rd2	Tc5
43.	Re1	A x h3
44.	Ac4	h5
45.	g x h5	g x h5
46.	Rf2	h4
47.	Td3	Af5
48.	Td4	h3
49.	Th4	Tc7
50.	Th5 (pide el abandono)	

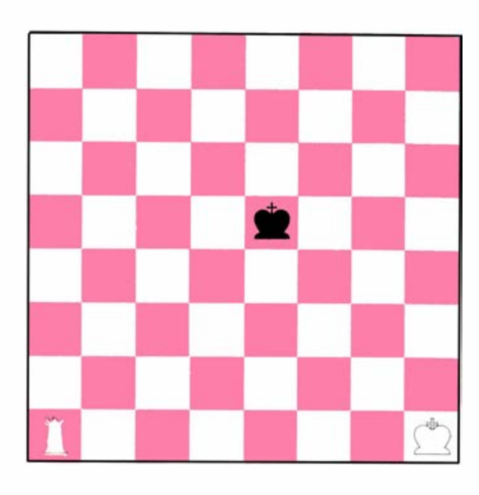
El programa CRAY BLITZ funciona sobre un ordenador Cray X-MP 48. A pesar de la fama adquirida por su velocidad como multiprocesador, Cray no deja de ser un ordenador para aplicaciones generales, y no una máquina ajedrecística especializada. BEBE, cuyos circuitos están específicamente concebidos para jugar al ajedrez, desbancó a la combinación Cray-CRAZY BLITZ en la partida anterior.

En cierto sentido, HITECH está aún más especializado. Cuando la Universidad Carnegie-Mellon era el Instituto Carnegie de Tecnología, se desarrolló en sus dependencias un programa ajedrecístico, bautizado TECH. El nombre HITECH refleja que Berliner, Campbell y los demás miembros del equipo, Carl Ebeling, Gordon Goetsch, Andy Palay y Larry Slomer, han revivido la tradición de TECH en un mundo de microcircuitos de integración a muy gran escala (VLSI) y de floreciente paralelismo. La máquina HITECH combina un ordenador Sun equipado con un procesador de diseño especial que Berliner llama "el buscador". El ordenador Sun ejecuta tres programas: una interfase de usuario, un controlador de tareas y un oráculo. El oráculo contiene todo lo que en la jerga de los especialistas en ajedrez computarizado se denomina "el libro", que es un gran catálogo de aperturas y variantes, que los jugadores humanos expertos acostumbran a conocer. La base de datos del oráculo contiene otra gran cantidad de conocimientos ajedrecísticos diversos, que puede ampliarse fácilmente. Cuando el buscador examina qué posibilidades ofrece el juego a partir de una posición dada, procede basándose en información ajedrecística pertinente en tal posición, que le suministra el oráculo.

El buscador propiamente dicho contiene un microprocesador y varios módulos que generan jugadas, las evalúan, comprueban si se repiten, etcétera. El microprocesador coordina sus actividades. El generador de jugadas consta de 64 microcircuitos VLSI, uno para cada casilla del tablero. Cada pastilla examina el tablero completo en busca de alguna pieza o peón que pudiera moverse hasta la casilla que tiene encomendada. Determina igualmente cuál sería la mejor jugada, basándose en los criterios habituales, así, oportunidades de captura o control del centro del tablero. De forma paralela, los otros 63 microcircuitos hacen otro tanto. Si el tablero contiene 10 piezas, tal organización arquitectónica supone que las posibles jugadas se generen 10 veces más rápido, a igualdad de los restantes factores.

La evaluación de jugadas debe ir al ritmo del proceso de generación. El propio generador de jugadas efectúa una primera etapa de evaluación. El generador de jugadas alberga una especie de supervisor que juzga las jugadas generadas por las 64 pastillas. Cada microcircuito calcula un número que es estimación de la fuerza de su mejor jugada, y transmite ese número al supervisor. Los números generados por los microcircuitos vienen a ser gritos en solicitud de atención. El supervisor los clasifica en orden de intensidad sonora (léase eficacia).

HITECH procede entonces a inspeccionar el árbol de juego, de acuerdo con la ordenación producida por el supervisor de las jugadas posibles a partir de la situación actual. El módulo de evaluación efectúa una segunda fase de valoración en cada nueva posición generada en el interior del árbol de juego. Valiéndose del conocimiento ajedrecístico (que le aporta el oráculo) relacionado con la situación presente, el módulo evalúa cada tablero, tanto si se encuentra en el horizonte de prospección como si no.Tal es la naturaleza del paralelismo. Este esfuerzo adicional no supone prolongación del tiempo. El controlador de tareas del ordenador Sun le dice al buscador hasta qué profundidad debe inspeccionar el árbol y, al completar la búsqueda, le indica si debe o no profundizar más. De este modo, aunque la prospectiva media de HITECH sea de 8 niveles, en ocasiones llega hasta los 14. Puede parecer que la distancia que lo separa de los 20 niveles estimados para vencer a un gran maestro es mucha. Por otra parte, el partido que HITECH saca del paralelismo, y el perfecto despliegue de conocimientos ajedrecísticos al buscar en el árbol pueden compensar la profundidad relativamente escasa de la búsqueda. En cualquier caso, en el Campeonato Mundial de Ajedrez Computarizado a celebrar el próximo mes de junio en Colonia probablemente resulte imposible vencer a HITECH.



3. ¿Cómo dar mate con torre y rey?

HITECH es la más moderna máquina ajedrecística del mundo. La primera de tales máquinas la inventó, en 1890, el ingeniero español Leonardo Torres y Quevedo. Valiéndose de sistemas mecánicos, palancas, poleas y conmutadores electromagnéticos, el autómata ajedrecístico de Torres era capaz de resolver un final de partida de rey y torre contra rey. A los jugadores humanos se les concedía el privilegio de gestionar los asuntos de un rey solitario afanado en evitar que la poderosa combinación de rey y torre con que jugaba la máquina le diera jaque mate. La máquina de Torres y Quevedo ganó siempre.

Se invita a los lectores a crear estrategias capaces de producir tal resultado. Es preciso suponer que el rey del jugador humano no inicia su existencia en situación de ahogo (cuando no puede moverse sin colocarse en jaque). La tarea consiste entonces en especificar en tan pocas reglas como sea posible cómo logra la máquina dar jaque mate, partiendo de una posición arbitraria. La posición que vemos en la ilustración de esta página es un punto de partida razonable.

La máquina juega con las blancas, y es la primera en mover. ¿Cómo han de combinarse el rey blanco y la torre para forzar al rey negro a sufrir jaque mate? Las blancas podrían comenzar moviendo su torre hasta la columna *d*. Ello evitaría que las negras desplazaran su rey más hacia la izquierda. Cabría repetir la maniobra si el rey negro, cortésmente, se moviera hacia la derecha,

pero ¿qué sucede si se empeña en permanecer en la fila *e*, limitándose a subir y bajar una y otra vez? Publicaré la solución más sucinta que se me envíe, tanto si es en lenguaje algorítmico como en lenguaje natural.

En el número de enero de este año se presentaron los "glovitos": glóbulos vivos finitos que tratan de pronosticar los cambios de su ambiente. En el caldo informático primordial, en cada generación, el más atinado en su predicción cruza su cromosoma con el de un glovito seleccionado al azar. De este modo van evolucionando predictores cada vez más atinados, hasta que se engendra uno perfecto.

Un glovito es, en esencia, un autómata finito. Es decir, tiene un número finito de estados, y por cada señal que recibe (un 0 o un 1) emite una señal y adopta un nuevo estado. La señal que cada glovito emite durante su ciclo de funcionamiento es su predicción de cuál será la próxima señal que reciba del entorno.

No faltaron lectores que propusieron a sus glovitos tareas de predicción imposibles. Jamás podrá evolucionar un glovito capaz de predecir una secuencia aleatoria de bits. Ni llegan a desarrollarse glovitos capaces de predecir números primos. Resulta perfectamente razonable pedirle a un glovito que vaticine una secuencia repetitiva de dígitos binarios. Por ejemplo, existe un glovito tetraestado capaz de predecir la secuencia 01100010 de ocho símbolos repetidos. Sin embargo, hasta una secuencia repetitiva puede rebasar la capacidad de predicción de un glovito si su período básico es demasiado largo respecto del número de estados del glovito. Por ejemplo, ningún glovito de 4 estados predecirá la secuencia repetitiva 010010111. ¿Por qué no?

La respuesta más sencilla a esta cuestión comporta un proceso que llamaré inducción trepadora. Imaginemos un glovito de un solo estado. Podría predecir la repetición sin fin de la ristra fundamental 01. Para cada una de las dos posibles señales que el glovito pueda recibir hay una respuesta: si se recibe un 0, el glovito emite un 1 y luego vuelve a asumir el mismo estado. Si recibe un 1, emite un 0. Si el período fundamental tiene tres símbolos –supongamos que sea 011– no le es posible al glovito predecirlo, sencillamente porque el autómata no dispone de repertorio de respuestas lo suficientemente abundante. Por otra parte, un glovito de 2 estados dispone de cuatro posibles respuestas, dos para cada estado. Así, puede predecir una serie repetitiva de cuatro símbolos, aunque no una serie de cinco; cuando llegue el quinto símbolo, el glovito habrá de repetir una de las respuestas anteriores. El razonamiento es obvio. Un glovito de n-estados puede predecir cadenas de hasta $2n$ símbolos, pero no las series que tengan longitudes de $2n + 1$ símbolos, o mayores. Se puede pasar un rato ameno preparando períodos de 8 símbolos, y construyendo seguidamente, a mano, el glovito tetraestado capaz de predecirlo. El predictor perfecto así obtenido es esencialmente único. Cabe medir el éxito del programa AUTOSOPA comparando el predictor perfecto obtenido de él por evolución con el glovito ya construido.

Varios lectores hallaron procedimientos para hacer que AUTOSOPA funcionase más rápido. Por ejemplo, no tiene mucho objeto poner a prueba la tanda actual de 100 símbolos ambientales si la cadena básica solamente tiene una longitud de seis símbolos. Una repetición de la cadena producirá 12 símbolos ambientales, los cuales deberían bastar para casi todos nuestros propósitos.

Philip Kaaret, de la Universidad de Princeton, ha señalado que el programa puede abreviarse también si en lugar de dársele puntuación a todos los glovitos de una población cada vez que se ejecuta el bucle principal solamente se le otorga a dos. Después de todo, únicamente dos glovitos (como máximo) habrán cambiado, a saber, el de puntuación mínima, que se ha remplazado por un nuevo híbrido, y uno de los restantes glovitos, que ha podido sufrir el impacto de un rayo cósmico.

Las aceleraciones que se obtienen, sea al abreviar la secuencia de ensayo ambiental, sea prescindiendo del ensayo para los glovitos antiguos, resultan sensiblemente equivalentes. Quedará así tiempo suficiente para hacer evolucionar glovitos n-estado que predigan secuencias repetitivas básicas de hasta $2n$ símbolos.

Por lo que dice en su carta, parece que Ed Coudal, de Park Ridge, Illinois, sentía cierta renuencia a enviar directamente el glovito de mínima puntuación a engrosar el coro celestial. Optó por cruzarlo en cada ciclo con el glovito de puntuación máxima. Obedeciendo a este ingenioso plan, Coudal logró producir, en menos de 40 generaciones, glovitos capaces de predecir una ristra fundamental formada por seis símbolos.

Taller y laboratorio

Aparato para comprobar la dispersión de partículas. Ensayos en ingravidez

Jearl Walker

En 1909, Ernest Rutherford sugirió un experimento que condujo al primer modelo moderno del átomo. Hans Wilhelm Geiger, investigador alemán que trabajaba en el laboratorio de Rutherford, había estudiado el paso de partículas alfa a través de láminas finas de metal. La mayoría de las partículas, dotadas de carga positiva, atravesaban directamente la lámina, incidiendo sobre una pantalla detectora situada al otro lado. Unas cuantas se desviaban levemente por efecto de las fuerzas eléctricas debido al cruce con los átomos de la lámina. Aquellas desviaciones no pasaban nunca de unos pocos grados, pues las partículas estaban animadas de una energía y una cantidad de movimiento considerables.

Sin embargo, Rutherford sugirió a Geiger que Ernest Marsden, un estudiante que trabajaba con Geiger, intentase detectar partículas que pudieran desviarse bajo ángulos mayores. Nadie, incluido Rutherford, esperaba encontrar nada. Pero, al cabo de unos días, Geiger presentó a Rutherford la asombrosa noticia de que algunas partículas se dispersaban bajo ángulos muy grandes, incluso en dirección a la fuente. Rutherford comentaría más tarde: "Fue el suceso más increíble que me ha ocurrido jamás. Tan increíble como que alguien disparase una bala de cañón de 15 pulgadas contra un tejido de papel, rebotase y te alcanzase."

La desviación de las partículas alfa en ese experimento se conoce hoy por dispersión de Rutherford. Sirvió para revelar que el modelo de átomo de la época era erróneo. Aquel modelo postulaba una distribución más o menos uniforme de partículas cargadas positiva y negativamente. Por tanto, cuando una partícula alfa penetrase en un átomo así, se vería atraída por las cargas negativas y repelida por las positivas de tal modo que la desviación, de existir, sería pequeña.

Cuando Geiger le anunció que algunas partículas alfa se desviaban considerablemente, Rutherford comprendió que éstas debían experimentar una fuerte repulsión eléctrica al penetrar en un átomo. Ello significaba que los componentes cargados de los átomos no presentan una distribución uniforme. Por el contrario, las partículas positivas se acumulan en una estructura central sumamente compacta, llamada núcleo, y las negativas orbitan en torno a éste a distancias muy grandes, comparadas con el diámetro del núcleo.

Imaginémonos que seguimos una partícula alfa cuando penetre en un átomo constituido de acuerdo con el modelo de Rutherford. Al aproximarse, el átomo no experimentará virtualmente fuerza eléctrica alguna, puesto que el átomo en conjunto es neutro. Pero cuando pase por entre las órbitas de los electrones comenzará a ser repelida por el núcleo, pues tanto la partícula como el núcleo están cargados positivamente. Supongamos que viaje directamente hacia el núcleo. Entonces, la repulsión siempre creciente la decelerará hasta detenerla momentáneamente, para luego impulsarla hacia atrás por el mismo camino. El ángulo de desviación que se forma es de 180 grados.

Una partícula alfa que penetre en un átomo según una trayectoria apartada del núcleo se desvía menos. Cuanto mayor sea la separación, tanto menor resultará el ángulo de desviación. Y, dado que el núcleo es minúsculo, son más probables las desviaciones pequeñas que las grandes. Por ello, Geiger y Marsden observaban al principio sólo desviaciones pequeñas.

La distribución de las partículas incidentes en la pantalla detectora se describe en función de la densidad de impactos por unidad de superficie de pantalla. La densidad depende del ángulo de desviación. La principal fuerza del modelo atómico de Rutherford residía en que predecía correctamente de qué modo variaba la densidad de impacto. Si bien varios investigadores habían propuesto con anterioridad modelos atómicos similares de naturaleza planetaria, a Rutherford se le atribuye el mérito del primer modelo moderno porque logró explicar la desviación de las partículas alfa.

El año pasado, en las finales de la Feria Internacional de Ciencia e Ingeniería, Rudy Timmerman, de Wickes, Arkansas, ganó el primer premio de la sección de física por sus experimentos acerca de la desviación de partículas alfa producida por una fina lámina de oro. Su propósito era repetir las líneas maestras del experimento de Geiger y Marsden; en especial, deseaba verificar la predicción matemática de Rutherford concerniente a la dependencia angular de la desviación.

Para ello Timmerman se sirvió de un diseño desarrollado por Charles W. Leming, de la Universidad estatal de Henderson, Arkansas. El aparato de Leming, ahora comercializado por Daedalon Corporation (35 Congress Street, Salem, Massachusetts 01970), está dotado de un tipo especial de película sensible al impacto de las partículas alfa. Esta película, cuando se revela, presenta un pequeño orificio en todos los puntos donde haya incidido una partícula.

De este aparato, Timmerman construyó su propia versión, que consistía en tres placas de aluminio sujetas mediante cuatro tornillos largos. En el centro de cada una había abierto un pequeño orificio. Encima del orificio de la placa superior colocó una fuente de partículas alfa. Debajo del orificio de la placa central montó una lámina metálica delgada. En la superficie superior de la placa inferior instaló la película detectora.

Esperaba que las partículas alfa atravesasen los dos orificios de arriba, formando un haz. Así, cuando atravesaran la lámina, en su mayoría proseguirían sin desviarse, aunque algunas se dispersarían por una pequeña zona en derredor del centro de la película detectora. Pretendía medir la distribución de orificios en torno al centro, y así determinar en qué medida la densidad de partículas dependía del ángulo de desviación. Aunque su plan era sencillo, tuvo que vencer varias dificultades antes de recabar la información que expuso en la feria.

Leming le suministró la película detectora y, además, elaboró un procedimiento para revelarla. Tras la exposición, la película se introduce durante 24 horas en una solución 2,5 molar de hidróxido sódico, la cual se mantiene a una temperatura de 40 grados centígrados. Timmerman construyó un aparato para revelar la película. Una lata, que

contiene la película en la disolución de hidróxido sódico, se pone al baño maría en un cubo. Con un calefactor de acuario calienta el agua y, con ello, el contenido de la lata. Con una tapadera y un poco de material aislante que rodee el cubo se rebaja la pérdida de calor hacia el ambiente. Un termómetro montado dentro del cubo registra la temperatura del agua.

Antes de comenzar sus ensayos Timmerman comprobó la intensidad de la fuente de partículas alfa colocando un trocito de película cerca de aquella durante unos minutos. Luego reveló la película para ampliarla y la puso en una máquina de microfilmes. Observó cientos de orificios, lo que indicaba que la fuente era lo bastante intensa para sus planes.

Seguidamente instaló la fuente y una nueva hoja de película en su aparato, pero sin montar todavía la lámina metálica. El aparato lo colocó en una campana de vidrio en la que hizo el vacío con un compresor para que las moléculas de aire no desviaran las partículas alfa. Pasados cinco minutos, retiró la película, la reveló y la examinó. Así volvió a encontrar numerosos orificios esparcidos alrededor del centro de la película. El aparato parecía adecuado.

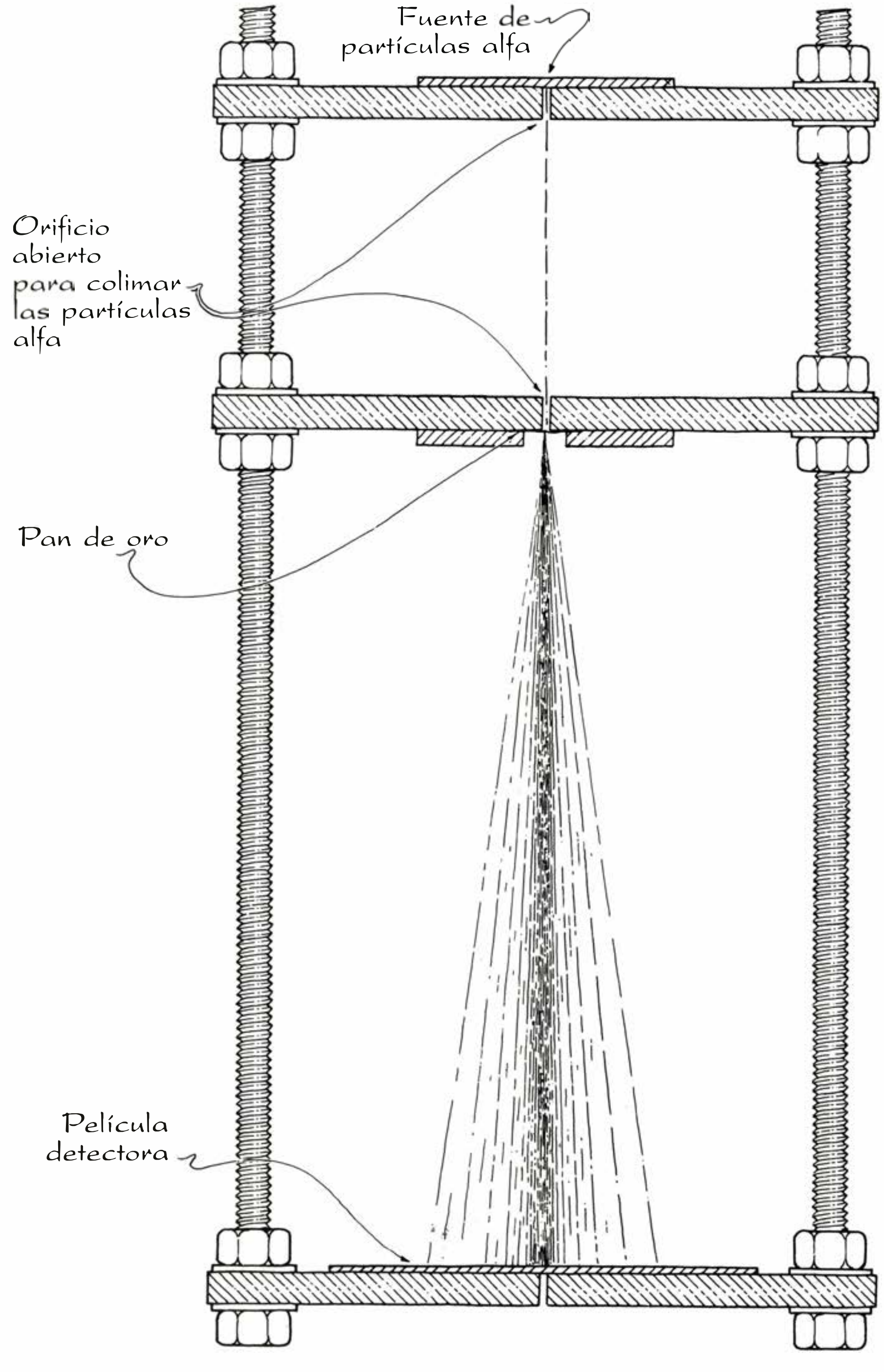
El paso siguiente fue colocar en el aparato la fina lámina de oro, que le había comprado a un pintor de rótulos de escaparates. Hizo el vacío en el aparato y dejó la película expuesta durante dos horas. Cuando la examinó, descubrió que durante el ensayo no se había conservado el vacío. Al revelarla la encontró toda cubierta de orificios, prueba de que las partículas alfa se habían dispersado debido a las moléculas de aire y habían rociado toda la película.

Timmerman concluyó que la campana perdía y que, por tanto, había que hacer el vacío varias veces a lo largo de cada ensayo. Para ello trató de dotar a la bomba de un mando automático conectando un interruptor electrónico a una de las entradas de un ordenador doméstico; programó a éste para que pusiera en marcha el compresor cada 30 minutos. El montaje hizo saltar el interruptor. Entonces montó un interruptor que controlara un relé instalado en la bomba, pero el relé empezó a fallar. Al final descubrió que la fuga no estaba en la campana, sino en la bomba de vacío. Desde ese momento cerró la manguera de la bomba en cuanto todo el aire hubiera sido extraído de la campana.

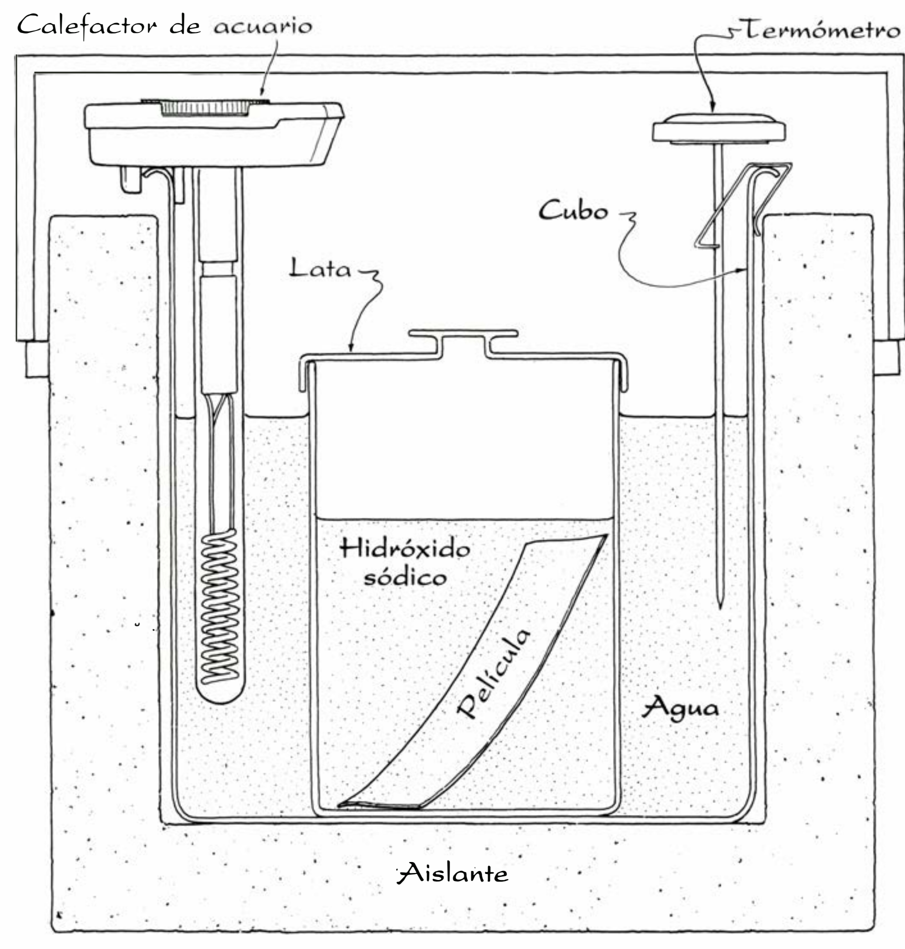
La siguiente dificultad a vencer era un defecto del calefactor de acuario que estropeó varias hojas de película. Incapaz de hallar algo que sustituyera al calefactor, Timmerman lo conectó al ordenador a través de una interfase. El ordenador debía recibir la señal de una sonda térmica introducida en el baño maría y poner en marcha el calefactor según se necesitara. Pero esto falló porque la sonda no funcionó correctamente. Decidió comprar otro calefactor.

Con una provisión de película nueva se dispuso a determinar el tiempo de exposición adecuado para sus experimentos. Con siete horas todo parecía funcionar bien. Cuando instalaba una hoja de película en la máquina de microfilm, veía sin dificultad los orificios producidos por las partículas alfa. Pero la medida de la distribución de los orificios con la máquina de microfilm resultaba demasiado difícil, por lo que optó por un procedimiento más automatizado al que pudiera incorporar el ordenador.

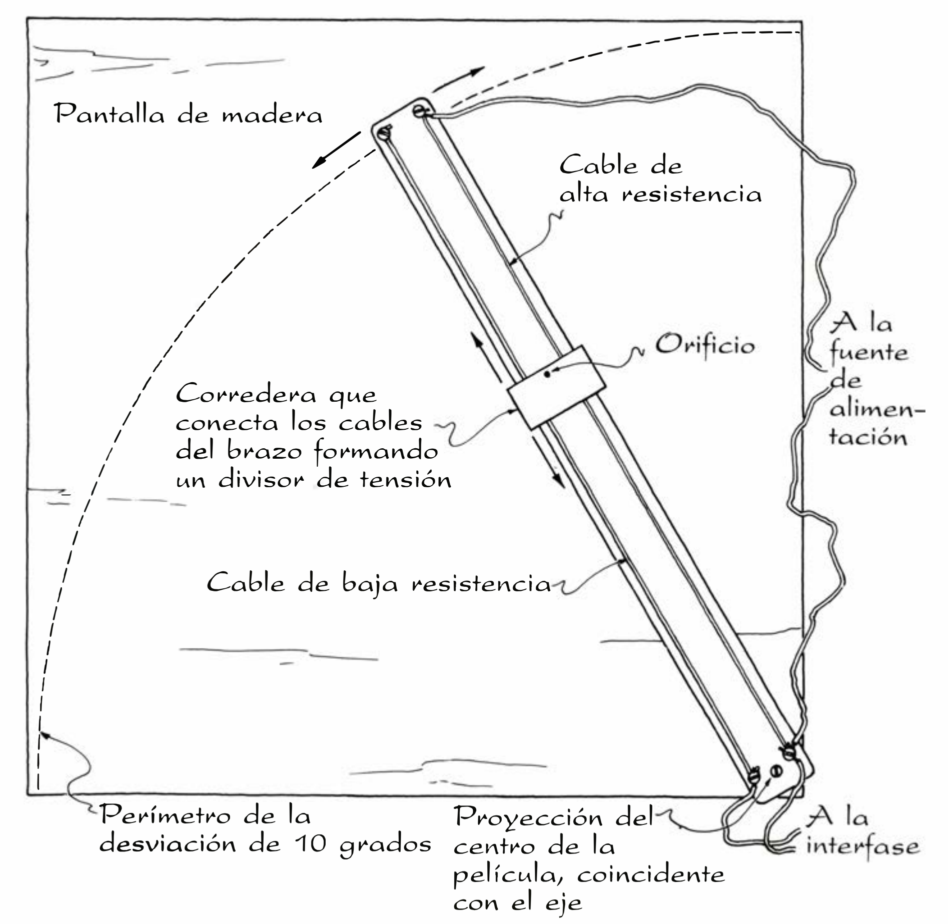
Proyectando la película sobre una pantalla de madera, construida por él mismo, se mejoraba la visión de los orificios. Estos aparecieron como manchitas brillantes. Para representar grá-



1. Aparato de Rudy Timmerman para dispersión de partículas



2. Revelado de la película especial



3. Instrumento de Timmerman para registrar las posiciones de los orificios de la película

ficamente su posición, montó un brazo de madera giratorio con centro en un eje fijo en una de las esquinas inferiores de la pantalla. El brazo llevaba una corredera dotada de una pequeña rendija. Girando el brazo y moviendo la corredera se puede conseguir que los puntos brillantes coincidan con la apertura.

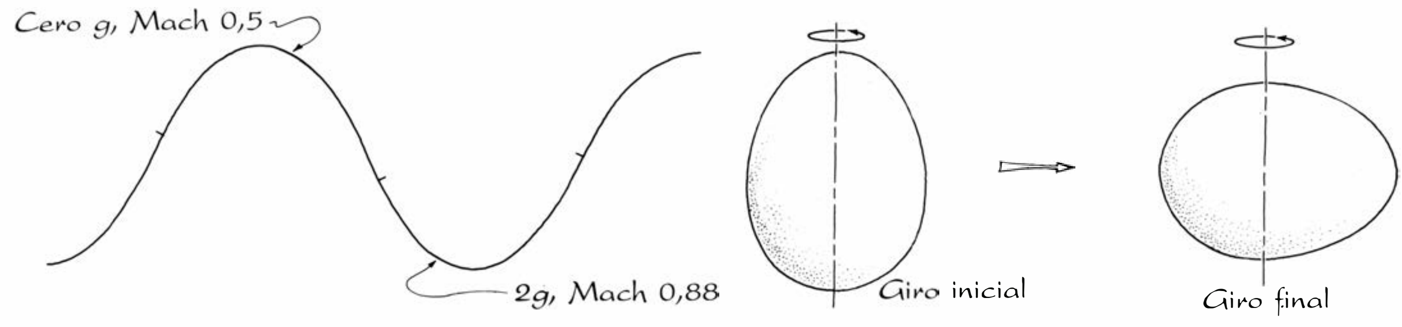
En la corredera y en el brazo instaló hilos conductores de modo que constituyeran un divisor de tensión. Cuando la corredera estaba cercana al eje de giro del brazo la tensión era baja; aumentaba si se desplazaba hacia el otro extremo del brazo. Así pues, la tensión entre los extremos de los conductores resultaba proporcional a la distancia entre la rendija de la corredera y el centro de giro del brazo.

Timmerman dispuso las cosas de manera que el centro de la película, punto al que llegaban las partículas alfa no desviadas, cayese directamente sobre el eje de giro. Seguidamente movió el brazo y su corredera hasta que la rendija coincidiera con un punto luminoso. De esta manera la tensión entre los conductores sería proporcional a la distancia entre el centro de la película y el punto de incidencia sobre ésta de una partícula alfa.

Timmerman se interesó por la distribución de las partículas alfa dentro de un ángulo de desviación de 10 grados. Por consiguiente, preparó el aparato para que las partículas desviadas 10 grados cayesen en la posición extrema de la corredera. Con la ayuda de James A. Wisman, de la Universidad de Arkansas en Fayetteville, construyó una interfase entre el divisor de tensión y el ordenador. La interfase partía en 256 intervalos la tensión máxima del divisor. Con ello, cada intervalo correspondía a 10/256 grados de desviación.

Para medir la distribución de la dispersión sobre la película, Timmerman llevó el brazo y la corredera a cada uno de los puntos brillantes de la proyección. Cuando la rendija de la corredera coincidía con un punto luminoso, accionaba un interruptor y la interfase enviaba una señal al ordenador. Esta señal indicaba qué intervalo de tensión (y, por tanto, qué ángulo de desviación) debía asignarse al punto. El ordenador registraba el dato.

Redactó entonces unos programas que calculaban la densidad de orificios en la película e imprimían un histograma de la densidad en función del ángulo de desviación. No satisfecho con estos resultados, repitió las experiencias con tiempos de exposición más largos (10 y 18 horas). Estos ensayos generaron tal abundancia de orificios en



4. Trayectoria de vuelo del avión para experimentos a cero g

5. El ensayo del huevo

la película que se necesitaron horas para medir su posición. Además, hizo la corrección necesaria para compensar el ruido de fondo de unos agujeros que aparecían en la película y que cabía presumir que no se debían a su fuente. Por último, para hallar la dependencia angular de la dispersión, trató de ajustar con varias funciones sus datos.

Concluyó así que la dependencia angular parecía seguir las predicciones de Rutherford. No obstante, como aún albergaba reservas acerca de la colimación del haz de partículas antes de llegar a la lámina metálica, contrastó sus conclusiones por dos procedimientos. Primero, pesó la lámina de oro al objeto de determinar su espesor. Luego, con la fórmula de la dispersión de Rutherford, calculó el espesor a partir de sus medidas de la densidad de orificios en la película. Ambos resultados concordaron por encima de un orden de magnitud.

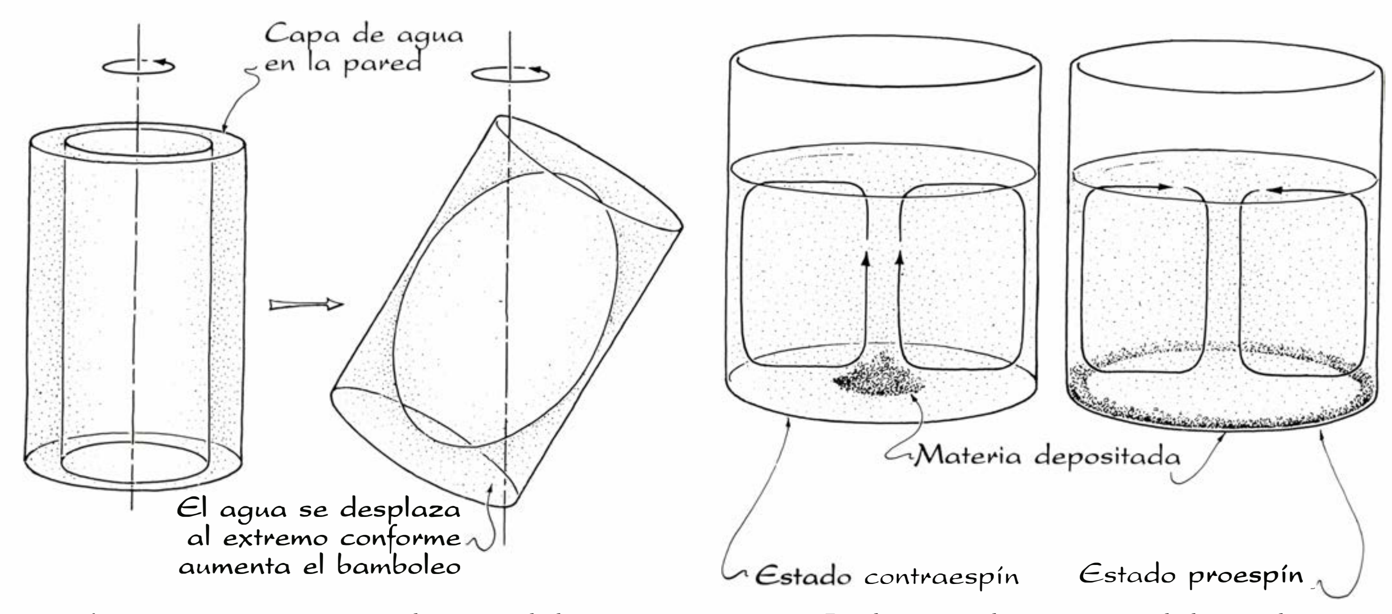
Muchas veces la gravedad modifica, de modos sutiles, el comportamiento de sólidos y líquidos. Para eliminar esta influencia, una técnica es estudiar materiales en caída libre. Donald R. Pettit, del Laboratorio Nacional de Los Alamos, y el astronauta Joseph P. Allen, del Centro Espacial Johnson, Houston, han efectuado hace poco experimentos de caída libre dentro de la cabina de carga de un avión perteneciente a la NASA. Les ayudó Robert K. Williams, también del Centro Espacial Johnson.

El avión llevó a cabo una serie de rizos parabólicos en número de 40 a 60. Conforme el aparato se acercaba al vértice del rizo con una velocidad aproximada de 0,5 Mach (la mitad que la del sonido en el aire circundante), los ocupantes comenzaban una caída libre. En realidad, el suelo del avión se separaba de ellos, pero su sensación era de que la gravedad desaparecía repentinamente. Este estado se denomina cero *g*, donde *g* representa la intensidad normal de la gravedad.

Unos 20 segundos después, la caída libre acababa cerca del tramo inferior del rizo. Durante los 50 segundos siguientes el avión empujaba hacia arriba a los ocupantes, provocándoles la sensación de que la gravedad doblaba su intensidad, estado conocido como de 2*g*. La velocidad del avión al terminar el picado era de unos 0,88 Mach. El breve tiempo de caída libre y la subsiguiente necesidad de protegerse ellos mismos y los instrumentos en la fase de 2*g* limitaron los estudios a fenómenos transitorios.

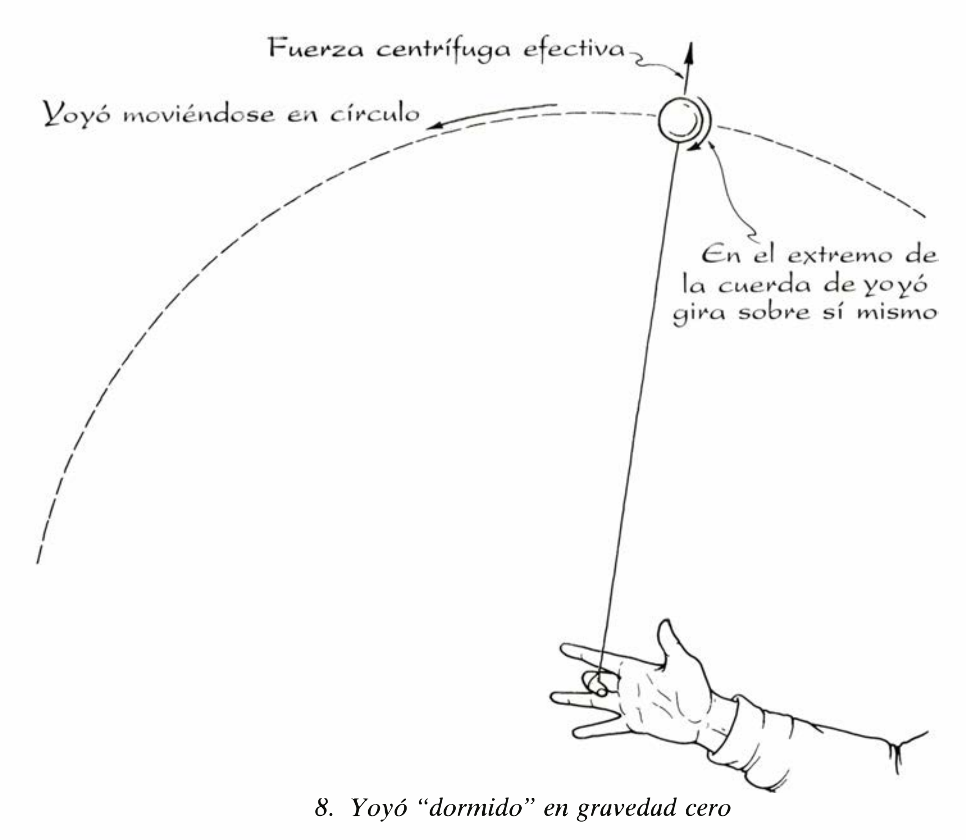
Además de sus investigaciones formales, Pettit y Allen tuvieron tiempo para algunos experimentos recreativos. Uno de éstos se refería a la estabilidad de un huevo girando en torno a su eje mayor. Trátese de poner derecho un huevo sobre una mesa y póngase a girar sobre cualquiera de sus extremos. Un huevo duro rotará establemente durante algunas decenas de segundo, pero uno fresco se torna enseguida inestable, se viene abajo y gira un rato en torno a su eje menor hasta que el rozamiento de la mesa disipa toda su energía.

Pettit investigó el giro de huevos a cero *g*. Para mejorar la visibilidad, trazó en todos ellos una línea de un extremo al otro. Entonces los puso a girar (en el aire) en torno a su eje mayor con el menor bamboleo inicial posible. El huevo duro proseguía rotando establemente durante toda la fase de cero *g* del rizo. El huevo fresco daba unas dos



6. Recipiente con agua rotando a gravedad cero

7. Flujo secundario con gravedad normal



8. Yoyó "dormido" en gravedad cero

vueltas y luego, de repente, empezaba a rotar en torno a su eje menor. Evidentemente, el fluido contenido en el huevo se ponía en movimiento debido a la rotación inicial, incluso a cero *g*. Este movimiento del fluido aumentaba el bamboleo, haciendo que el huevo girase alrededor de su eje menor.

Seguidamente Pettit realizó un experimento similar con un recipiente cerrado y transparente, parcialmente lleno de agua. Lo soltaba a cero *g*, a la par que le comunicaba un giro en torno a su eje mayor. El recipiente no tardaba en bambolearse apreciablemente, pero nunca se estabilizaba en rotación en torno a su eje menor antes del final del cero *g*.

Pettit y Allen estudiaron también el movimiento de un fluido dentro de sistemas en rotación. Consideremos un recipiente cilíndrico de agua situado en el centro de un plato giradiscos. Cuando éste se pone a girar, las paredes del recipiente, por rozamiento, provocan que el agua se mueva en círculo. Al final, el agua circula alrededor del centro del recipiente a la velocidad del giradiscos. Durante la transición diremos que el agua está en proespín. Supongamos que el giradiscos se pare bruscamente. El movimiento se frena y acaba por detenerse. En esta fase diremos que el agua está en contraespín.

Durante el proespín y el contraespín se organiza en el agua una corriente adicional. Este flujo secundario es resultado de la diferencia de presión que aparece en el agua a causa del flujo primario alrededor del centro. En el proespín, el flujo secundario marcha hacia abajo a lo largo del eje geométrico, hacia fuera por el fondo, hacia arriba por la pared y, luego, hacia dentro por la superficie superior. En el contraespín, esta corriente secundaria se mueve en sentido inverso. La existencia de la corriente secundaria podemos comprobarla con el movimiento de las hojas de té cuando éste se halla en contraespín. Las hojas, inicialmente esparcidas por el fondo de la taza, se ven impulsadas hacia el centro, donde quedan abandonadas y apiladas por el flujo ascendente de agua.

¿Qué le pasa al flujo secundario a cero *g*? Pettit llenó parcialmente de agua el recipiente cerrado y transparente, agregando media cucharadita de serrín empapado de agua y otra media de escarcha de aluminio. (Esta se puede comprar en una tienda de artículos para *bricolage* y trabajos artísticos.) El serrín y la escarcha le sirvieron de trazadores del flujo secundario.

Bajo condiciones de gravedad normales, el flujo secundario hacía que la escarcha se reuniera, como las hojas de té, en una pila en el centro del recipiente. El serrín circulaba en anillo, justo por encima del centro del fondo, hasta cerca del final del contraespín, cayendo entonces sobre el montoncito de escarcha. En el proespín, la escarcha se trasladaba primero hacia la pared, seguida del serrín, que es más liviano. A cero *g* Pettit soltó el recipiente, mientras le comunicaba un giro. El agua se puso en proespín. El serrín y la escarcha, como antes, se desplazaron hacia la pared, pero en esa ocasión no se reunieron en el borde del fondo. La escarcha quedó oprimida contra la pared y el serrín trepó por ésta.

Para generar un contraespín Pettit hizo rotar el recipiente y después lo sujetó. El serrín y la escarcha siguieron al esperado flujo secundario, pero no llegaron a apilarse en el fondo.

Es evidente que el flujo secundario en proespín y contraespín es el mismo a cero *g* que a gravedad normal. Sin embargo, el efecto de la ausencia de gravedad es que el serrín y la escarcha ya no quedan confinados al fondo del recipiente. El flujo secundario puede transportarlos hacia arriba por el centro del recipiente, durante el contraespín, y por la pared durante el proespín.

Pettit y Allen hicieron otro experimento con el recipiente. Cuando el agua circula alrededor del eje mayor de un recipiente bajo la gravedad normal, la superficie superior es cóncava. Se preguntaron entonces de qué modo variaría esa forma al variar la gravedad efectiva. Hallaron que a 2*g* la concavidad es menor y que a cero *g* la concavidad es tan pronunciada que provoca que toda el agua forme una capa sobre las paredes.

En un experimento final ensayaron con un yoyó a cero *g* y a 2*g*. Preguntaron si podrían hacerlo girar en el extremo de la cuerda, lo que suele conocerse como dormir el yoyó. Para ello, con la gravedad normal, hay que dejar que el juguete llegue suavemente al final de la cuerda, para reducir al máximo el rebote usual. Entonces, la gravedad lo mantiene ahí mientras gira libremente en el lazo que rodea al eje.

A 2*g* Pettit puso a dormir el yoyó sin dificultad. Pero a cero *g* se resistía, incluso con un lanzamiento muy suave, y rebotaba siempre. La única forma en que consiguió dormirlo fue lanzándolo hacia afuera y luego tirando de la cuerda. Eso hacía que el juguete diera vueltas alrededor de su mano, pues la consiguiente fuerza centrífuga producía el efecto de mantenerlo en el extremo de la cuerda.

A Pettit le interesan más experimentos que pudieran realizarse a cero *g*. Si alguien tuviera alguna idea puede escribirle a Los Alamos National Laboratory, MS P952, Los Alamos, Nuevo México 87545.

Libros

Percepción, zeolitas, ecosistema insular, microtúbulos y relatividad

José María Peiró, Andrés Pulgar, Xavier Niell, Pilar Sesma y José Manuel Sánchez Ron

La Percepción, por Irvin Rock. Biblioteca Scientific American; Prensa Científica - Editorial Labor; Barcelona, 1985. El título de la presente obra señala el área científica en la que se insertan sus contenidos aunque, en nuestra opinión, no los delimita adecuadamente. Se centra en los problemas de la *percepción visual*, seleccionando de entre ellos, con buen criterio, los relativos a la "percepción de las propiedades de los objetos..., de su distancia de nosotros y de su movimiento... El libro investiga también aquellos casos en que el proceso perceptual no alcanza la representación correcta, esto es, los casos de ilusión" (pág. viii). El propio autor emplea una buena parte del Prefacio advirtiendo al lector de los temas no tratados: "en una breve introducción como ésta difícilmente puede tratarse la percepción *visual* con la amplitud que merece".

Este comentario inicial no pretende restar mérito a la obra, sino poner de relieve la complejidad y amplitud de la psicología de la percepción, así como su intenso desarrollo en los años recientes. Los diez volúmenes de la obra editada por E. C. Carterette y M. P. Friedman (1975-1979) pueden acreditar lo dicho.

El libro de Irvin Rock se centra, pues, en la percepción visual y tanto la selección de los temas como el nivel con que han sido tratados lo convierten en un excelente manual introductorio. Está organizado en nueve capítulos que van planteando las cuestiones más relevantes sobre la percepción visual del mundo, al tiempo que sugiere respuestas y explicaciones acerca de ellas.

El primer capítulo, de caractér introductorio, presenta las principales aproximaciones teóricas y el carácter científico de la psicología de la percepción; sobre todo, pone de manifiesto la voluntad de no adoptar una posición ecléctica. Son significativos los títulos de los dos primeros apartados: "el ojo es una cámara fotográfica" y "la percepción es un constructo mental". Se anuncia, pues, una aproximación teórica claramente cognitiva e inferencialista frente a otras como la fisicalista o la empirista radical. Esta toma de posición teórica se corrobora a lo largo de toda la obra y ello, junto con la fundamentación experimental que el autor aporta, resulta esclarecedor al tiempo que permite comprobar las cuestiones no resueltas. En el segundo capítulo, dedicado a la constancia, se presta especial atención a los problemas relativos a la constancia del tamaño y a la de la luminosidad. Se revisan las principales teorías y la polémica acerca de su origen innato o aprendido; y se ofrecen vías explicativas de la misma. Resulta también interesante la consideración que en él se realiza de los "fallos de la constancia" al elaborar su explicación dentro del marco teórico establecido para describirla en su funcionamiento "normal".

En el capítulo tres se plantea el estudio de la percepción de la tercera dimensión y de la profundidad. Se examinan los diversos fenómenos que intervienen: la disparidad retiniana, las señales oculomotoras, las señales de movimiento, las señales pictóricas y los resultados de la conjunción de todas ellas. Se aborda la polémica acerca del origen innato o adquirido de esta capacidad perceptiva a través de un análisis genético del fenómeno.

No se olvida, en el capítulo cuatro, un tema de gran interés, apenas descrito sistemáticamente en muy pocos manuales de psicología de la percepción. Nos referimos a la percepción y el arte. El estudio de los problemas de la distorsión, la percepción de las pinturas, las convenciones pictóricas y, sobre todo, el de la relación entre percepción y dibujo (que vincula la percepción visual con la actividad motora), muestra de manera rigurosa y atractiva la relevancia de la psicología de la percepción en la actividad y en la apreciación de las obras de arte. Este capítulo podría haberse retrasado hacia el final de la obra, una vez considerada la percepción de la forma o las ilusiones.

El capítulo cinco se ocupa de la percepción de la forma y de la actividad organizadora del sujeto en ella. Los temas clásicos de la percepción figura-fondo, las leyes de la agrupación y el fenómeno de la inversión perceptual aparecen desarrollados junto con otros más actuales como el reconocimiento y la identificación de formas, las repercusiones que tiene la orientación en la percepción de la forma y el proceso de discriminación de formas similares. Se plantea, además, el papel de la experiencia y el de los motivos y emociones en el proceso de la percepción.

Si los capítulos anteriores han presentado las características "legales" que cumplen los diversos fenómenos perceptivos en "condiciones normales", el sexto analiza las diversas ilusiones perceptivas. La ilusión de Ponzo, la de Poggendorff, la de Müller-Lyer y la del pasillo reciben una detenida atención, al tiempo que se pasa revista a las interpretaciones teóricas, insistiendo en aquellas que las contextualizan en un marco más amplio, sin olvidar las relaciones con las conocimientos obtenidos al estudiar la percepción "verídica de la vida diaria" (pág. 175).

El capítulo siete se ocupa de la percepción del movimiento en sus múltiples aspectos. Aborda la percepción del movimiento tanto en posición estática como en posiciones dinámicas del sujeto perceptor y los problemas planteados por la percepción del movimiento relativo, junto con los efectos ilusorios suscitados en estos tipos de percepción visual. Las ilusiones de la dirección, los fenómenos de movimiento aparente, el efecto autocinético y los postefectos del movimiento son, en síntesis, los puntos expuestos.

La relación entre la actividad visual y la vestibular se desentraña en el capítulo octavo. Bajo el título "el mundo

al derecho" se pasa revista a los problemas surgidos de la orientación espacial y la orientación egocéntrica. Se analiza detenidamente el estado de nuestros conocimientos tras los estudios sobre percepción invertida mediante artilugios ópticos y los procesos de adaptación que se producen ante esta nueva situación por parte del sujeto perceptor.

Finalmente, el capítulo nueve plantea el tema de la inteligencia de la percepción. Se someten a criba, de nuevo, las tesis de las tres tradiciones más relevantes: la inferencialista,la gestaltista y la fisicalista; se citan las grandes opciones especulativas que una teoría de la percepción ha de resolver. El autor toma partido al esbozar una teoría de la percepción que él mismo caracteriza de "cognitiva" y próxima a la tradición inferencialista, defendida hace más de un siglo por Helmholtz.

La obra reúne, además, otras características dignas de mención. En primer lugar, la excelente presentación gráfica y el gran número de figuras e ilustraciones, adecuadamente seleccionadas y cuidadosamente reproducidas. En segundo lugar, la agilidad y el estilo directo con que ha sido escrita. El autor evita, en lo posible, el exceso de citas y referencias bibliográficas, mencionando, con todo, los principales trabajos en cada caso. Se observa una orientación centrada en la temática y no en la erudición bibliográfica. Al final de la obra aparecen algunas referencias bibliográficas para cada capítulo. Sin embargo, el lector que busque una fuente amplia de referencias puede quedar algo defraudado. En tercer lugar, la obra ofrece un índice temático que puede resultar muy útil para la consulta y la localización de los temas.

Por lo que se refiere a la versión castellana cabe plantear también una serie de consideraciones. Primero, la prontitud con que ha sido publicada. El original inglés apareció en 1984 y la versión española en los primeros meses de 1985. Es de valorar el esfuerzo editorial realizado para poner esta obra a disposición de los profesionales y estudiantes de habla hispana.

También hay que destacar la pulcritud y corrección de la traducción realizada, aunque en algunos puntos concretos se hayan deslizado imprecisiones o errores de poca monta. Así, en la página 197, línea 17, dice "indiferencial" en lugar de "inferencial"; en la página 158 se inicia el apartado relativo a la ilusión de Poggendorff remitiendo a la "ilustración superior izquierda de la página siguiente", es decir la 159, cuando en realidad se debiera decir en la página 160. A este par de erratas agregaría algunas faltas de coherencia en la traducción. En la página 7, línea 37, se habla de "vericidad" mientras que en la página 25, línea 26, se usa el término "veridicidad". Algo similar ocurre con la traducción que hace referencia a la "teoría de la relación entre estímulos" (pág. 20, línea 14), posteriormente traducida por la "teoría del estímulo-relación" (pág. 47, línea 4), o la que se refiere a la "teoría de la toma en consideración" (pág. 23, línea 34) posteriormente denominada "teoría de la toma en cuenta" (pág. 29, línea 3).

Nos encontramos, pues, ante una obra de contenido y presentación excelentes, aconsejable para estudiantes de psicología y pedagogía y para profesionales en esos campos. Es además especialmente idónea para los alumnos de Bellas Artes que hayan de cursar la asignatura de "Psicología de la percepción". La claridad de exposición, el rigor con que han sido tratados los temas, el adecuado criterio de selección de los mismos y la toma de posición teórica constituyen, sin duda, sus méritos principales, además de su cuidada presentación. (J. M. P.)

ZEOLITES; SCIENCE AND TECHNOLOGY. Preparado por F. Ramboa Ribeiro et al. Martinus Nijhoff Publishers; La Haya, 1984. Pertenece este libro a las denominadas *NATO ASI Series*. Recoge las actas de los trabajos y resultados del congreso que sobre ciencia y tecnología de las zeolitas se celebró del 1 al 12 de mayo de 1983 en Alcabideche (Portugal) bajo el patrocinio del comité científico de la OTAN encargado de promover el progreso de la ciencia y la técnica de los países miembros.

A lo largo de los últimos 25 años las zeolitas se han convertido en foco de una actividad técnica intensa, merced a sus aplicaciones como cambiadores de iones, en procesos de adsorción y como catalizadores. La alta tecnología de las zeolitas comenzó con la producción sintética de ellas, desde las denominadas zeolitas *A*, *X* e *Y*, hasta la aparición de las series *ZSM*. De entonces acá, se ha avanzado en la selección de estos silicatos naturales y su aplicación a amplia escala, amén de en funciones tan importantes como la purificación y separación en procesos petroquímicos de interés (el cracking catalítico y la alquilación de aromáticos).

Al ser el libro un compendio de artículos o conferencias sin plan previo de publicación, agrupados eso sí del modo más afín, no se puede evitar la repetición obligada de hechos y nociones. Cuatro partes articulan la obra. La primera agrupa una serie de trabajos relativos a la historia, estructura y síntesis de zeolitas; más un artículo sobre cristalografía y otro sobre el estudio y mecanismo de cristalización de zeolitas *A*, *X* e *Y*. Destacaría aquí una completísima tabla de clasificación y datos cristalográficos.

En la parte segunda se describen los métodos físicos empleados para caracterizar y determinar estructuras: técnicas de difracción de rayos X, espectroscopía infrarroja, RMN, espectroscopía Moessbauer y análisis térmicos diferenciales. Termina este capítulo con un estudio de R. M. Barrer sobre la adsorción por zeolitas, dividido en dos secciones, una sobre equilibrios y balances energéticos del proceso y otra sobre la cinética y difusibilidad intercristalina, ambas desde el punto de vista termodinámico y fisicoquímico.

La tercera parte del libro cubre el área de la catálisis. Se sugiere en ella que la clave para la distinción de los diferentes catalizadores zeolíticos sea la de sus distintas aplicaciones industriales: 1.º) catálisis selectiva basada en efectos de tamiz molecular o limitaciones de difusión; 2.º) acciones de alta concentración de iones (H^+) para actuar sobre estructuras de átomos de oxígeno; 3.º) acciones de mejoría en reacciones de ionización y estabilización de iones carbenio, y 4.º) acciones de mejoramiento de reacciones por pasos bimoleculares sobre reacciones unimoleculares, debido a la alta concentración de los hidrocarburos reactivos dentro de los cristales de zeolita.

Se incluye un trabajo, bien elaborado, relativo a los procesos de catálisis de conformación molecular selectiva, en el que se exponen, además del factor de alta selectividad, el rendimiento a alta temperatura con una mínima desactivación, compensada por el factor selectivo. Se exponen también procesos y mecanismos de catálisis bifuncional en zeolitas para procesos industriales en el refino de petróleos e industria petroquímica, de obvio interés para quienes desarrollan métodos petroquímicos en las divisiones de investigación de las refinerías.

El libro termina con una recopilación de temas de ingeniería química. Entre otros, nos introduce en el diseño de reactores de proceso catalítico y el cracking catalítico con la simulación de modelos. No podía faltar la conversión

del metanol en hidrocarburos con la utilización de las zeolitas como catalizadores; se exponen los mecanismos de la conversión mediante la aceptación de la hipótesis de los iones carbenio como intermediarios. Los capítulos finales detallan procesos industriales de operaciones por cambio iónico, entre los que destaca el tratamiento de aguas residuales urbanas y la extracción del ion NH^+ contenido en ellas. Se esbozan futuras aplicaciones de las zeolitas: almacenamiento de desechos radiactivos y aplicaciones biológicas, agrícolas, médicas (por regeneración de disoluciones de diálisis artificiales) y otras.

La impresión en offset, propia de este tipo de libros, si bien resulta de fácil lectura, reproduce muy pobremente las ilustraciones, dibujos y fotografías. (A. P.)

ELS SISTEMES NATURALS DE LES ILLES MEDES. Preparado por J. D. Ros, I. Olivella y J. M. Gili. Institut d'Estudis Catalans; Barcelona, 1984. Al final de la revisión, apresurada y muy poco facilitada por la editorial, de esta obra, escribo esta recensión que subtitularía, a tenor de lo que Ros dice en la introducción, "el parto de las Medas", puesto que el tiempo de gestación, después de las primeras dudas de embarazo ha sido de ¡diecisiete años!".

Algunos hemos seguido el desarrollo del "nasciturus" y con satisfacción asistimos ahora a sus primeros pasos. En muchos libros, el autor entierra sus ilusiones y en algunos incluso mata al protagonista; este volumen es, sin salirnos del símil literario, la crónica de un nacimiento anunciado. Al protagonista no hay que matarlo, pero sí tratarlo de distinta manera en adelante: con la base de conocimientos que el libro establece, ahora, o mejor dicho a partir de ahora, hay que usar las Medas como punto de partida para trabajos futuros.

Los datos y los trabajos que lo integran son una recopilación de muchos años de esfuerzos y dedicación loables. Aunque algunos de los datos aquí expuestos fueron publicados ya en revistas y libros, dan fe de la indudable personalidad del grupo de bentos del departamento de ecología de la Universidad de Barcelona.

Estoy de acuerdo con el profesor R. Margalef en que en este libro hay una inestimable descripción autoecológica y sinecológica, si bien es pobre en estudios funcionales. Pero añadamos en seguida que es una obra de necesaria referencia, al menos en el Mediterráneo. Sacarán partido los alumnos del tercer ciclo. Yo lo recomendaría incluso a los bibliófilos, a pesar de algunas fotografías en blanco y negro, pues está bien confeccionado, con ilustraciones excepcionales de Mikel Zabala, cartas bionómicas preciosas y toques de erudición, como el artículo de M. Audivert y J. Surroca sobre la historia de las islas.

La obra no es una guía de la naturaleza, para ello le faltan ilustraciones en los capítulos dedicados a los distintos grupos, pero contiene buenos y exhaustivos catálogos de todo tipo de animales y plantas. Es un cúmulo excepcional de información, con dos índices de nombres taxonómicos y vernáculos bien hechos, incluso de interés lingüístico; quizá se eche de menos un índice de palabras clave que abriera la entrada por conceptos ecológicos a los distintos capítulos.

Volcado el libro a los estudios del medio marino, es de justicia señalar el artículo de 0. de Bolós y J. Vigo sobre la vegetación terrestre, de absoluta precisión y minuciosidad, elegantemente escéptico con respecto a los cambios nomenclaturales en sintaxonomía. Dicho capítulo constituye una lección sobre la deducción del clima por la composición de la vegetación y de lo que debe ser una confección de floras locales.

El concepto de isla no se ha prodigado en el estudio del medio terrestre, aunque sí se ha traído a colación en los capítulos de insectos (Español) y formicidos (Espadaler y Roda), siendo especialmente incitador a la reflexión el tratamiento que estos últimos autores dan a la combinación altura-superficie de las islas y no a la combinación distancia-dimensiones de la teoría clásica, que se relaciona con el número de especies que las islas contienen.

En todos los capítulos dedicados a la descripción del medio terrestre se reincide en conceptos paleogeográficos y climáticos, lo que pone de manifiesto un excesivo individualismo y cierta desorganización en la descripción. El medio marino es la célula alrededor de la que cristaliza toda la obra. Los artículos tienen una información general que a modo de introducción se cubre con éxito distinto: algunas veces no hay prácticamente citas bibliográficas; otras, se apoyan en conocimientos generales y usados desde hace tiempo con citas algo domésticas del propio autor del capítulo, cuando no ocurre que la bibliografía es mayormente la del equipo, en merma del inestimable valor que tendría el libro como recensión general de trabajos en las distintas materias. No es infrecuente hallar una superficial descripción de tipos de organismos, que casi siempre, se dice, son estrategas *r* y *K*; este concepto, de interés didáctico, se usa machaconamente.

En lo relativo a los grupos de organismos recolectados en las Medas, la información es muy valiosa, los inventarios bien hechos y los resultados, algunas veces, como en el caso de las algas, espectaculares, salvando aproximaciones algo peligrosas a la escuela de Marsella. En dicha escuela el concepto de especie es clásico en exceso, detallista y tan morfológico que se puede temer que sea fenológico.

Culminan la parte científica del libro descripciones de los distintos sistemas, terminados a mi juicio con fortuna desigual. Los dos primeros capítulos de este tercer grupo, 34 y 35, debieran estar al principio de la obra y el criterio metodológico hacerse extensivo, si cabe, al medio terrestre.

En Cataluña se han hecho al menos dos obras como la presente, lo que constituye una excepción en España. El número de estudios de este tipo, aún así, es menor, pongo por ejemplo, que en la región de Lille o que en cualquier condado británico. (X. N.)

MICROTUBULES, por Pierre Dustin. Springer Verlag; Berlín, 1984. La primera edición, publicada en 1978, acogida con interés en todas las áreas de las ciencias biológicas, fue muy aplaudida por los citólogos. Esta reacción debióse, sin duda, a que en la década de los 60 se había producido el resurgimiento de la noción de "citoesqueleto" que, utilizada en 1928 por Koltzoff, había caído en un olvido de más de 30 años. Las técnicas cada vez más depuradas de microscopía electrónica, especialmente la prefijación con aldehído glutárico, permitieron contemplar los microtúbulos y establecer su relación con la forma de la célula y con múltiples funciones de ésta. Por otra parte, la puesta a punto de técnicas de aislamiento de las proteínas que constituyen los microtúbulos produjo una auténtica revolución en la citología, al someterse a un estudio atento el denominado "citoplasma fundamental" que, en muchos tipos celulares, considerábase carente de estructura.

La primera edición de *Microtubules* recogía el esfuerzo gigantesco de compendiar, en una monografía de proporciones discretas, la gran cantidad de datos acumulados en la abundante biblio-

grafía ya existente. Ello suponía la selección correcta del material, magistralmente realizada por una figura mundial en este tema.

No cabe duda de que el interés suscitado en el último decenio por los microtúbulos y filamentos, y la conjunción de las técnicas de microscopía electrónica con otras procedentes de diferentes áreas del saber, especialmente la inmunología, han producido una verdadera "explosión bibliográfica" en el estudio del citoesqueleto. El vasto material existente convierte en tarea imposible pretender abarcarlo sin una excepcional capacidad. Por ello, esta segunda edición es acogida, si cabe, con mayor interés que la primera.

Se trata de una monografía que proprociona una visión global y unitaria, a la vez que completa, de los microtúbulos en todo el mundo biológico tanto animal –desde Protozoos hasta Mamíferos– como vegetal. El autor ha conseguido en un volumen de una extensión muy similar a la de la primera edición actualizar su contenido e introducir conocimientos nuevos e importantes: caracterización de las proteínas asociadas a los microtúbulos, procedimientos de ensamblaje de éstos *in vivo* y otros. La revisión de los temas es tan profunda que existen capítulos cuyo contenido es casi totalmente nuevo con respecto a la versión precedente.

Destacaría los avances registrados en la bioquímica de los microtúbulos y las proteínas con ellos relacionadas, así como los progresos de los aspectos farmacológicos, con la consiguiente aplicación al área de la patología médica de la colchicina y de otros agentes que interaccionan con las tubulinas. Añádase a ello las implicaciones de los microtúbulos en la morfología y fisiología celular. Así, en el capítulo de motilidad celular, se detiene en el movimiento de linfocitos y macrófagos, responsables de las reacciones inmunológicas. En esta misma área está recogida la intervención de los microtúbulos en la secreción de inmunoglobulinas a cargo de las células plasmáticas. Y si al lector le interesa la neurobiología, disfrutará con lo expuesto a propósito de los componentes moleculares y estructurales del transporte axónico y su posible mecanismo.

Todos los capítulos se acompañan de una extensa bibliografía. El libro incluye una relación de los trabajos más interesantes aparecidos en 1983 y en 1984. Esta relación se halla convenientemente clasificada por temas; los trabajos se presentan con un comentario escueto, lo que confiere un alto valor informativo a esta parte del libro, ya que permite conocer los últimos datos acerca de aspectos concretos de los microtúbulos. (P. S.)

LA RELATIVIDAD GENERAL: DE LA A A LA B, por Robert Geroch. Alianza Universidad; Madrid, 1986. La historia de las dos teorías de la relatividad, la especial y la general, es ya larga. Han pasado más de setenta años desde que fueran formuladas (en 1905 y 1915, respectivamente) por Albert Einstein. Muchos han sido, durante este tiempo, los libros publicados en los que se ha pretendido exponer de forma clara los fundamentos de ambas teorías. El texto de Robert Geroch, *La relatividad general: de la A a la B*, es, en mi opinión, uno de los más lúcidos y originales productos de esta tradición, que ha contado entre sus practicantes con figuras de la talla de Moritz Schlick, el propio Einstein, Bertrand Rusell o John Wheeler, por citar algunos ejemplos.

El libro de Geroch, un conocido relativista por sus contribuciones a la teoría de las singularidades en relatividad general, es, en realidad, un tratado elemental –aunque no por ello menos profundo– de la medida en física clásica. Con delicadeza, casi con mimo, Geroch nos va conduciendo desde nuestras aprehensiones más intuitivas y básicas de la estructura del espaciotiempo (enfoque aristotélico) hasta las más refinadas nociones de la relatividad, pasando por el punto de vista que dominó la física desde los tiempos de Galileo y Newton, hasta la formulación de la teoría de la relatividad especial, el "enfoque galileano".

Los sucesos, las líneas de universo, los pulsos de luz y el intervalo son las "estrellas" principales de esta trama, de tinte operacionalista, en la que el autor describe su personal visión de la metodología científica. De hecho, como él mismo confiesa, su exposición tiene algo de excusa para explicar cómo trabajan los físicos, para transmitirnos que la idea básica de pensar sobre el mundo físico no es sustancialmente diferente de pensar sobre cualquier otra cosa. En palabras del propio Geroch, que cierran el libro: "los físicos, como grupo, no son más certeros en sus conclusiones ni más poseedores de la 'verdad' que otros". He de reconocer, no obstante, que tan saludable propósito se ve empañado, paradójicamente, por la brillantez, claridad y originalidad de la presentación de este profesor de Chicago formado en la escuela de Penrose y Hawking; su exposición me ha producido, por mucho que su autor pretendiera otra cosa, un sentimiento de que "la física no es, ciertamente, como cualquier otra actividad". Inconvenientes de la excelencia pedagógica.

Una advertencia: aunque el título de esta obra se refiere a la relatividad general, la mayor parte de ella es un análisis de los fundamentos de la relatividad especial. De hecho, tales capítulos constituyen lo mejor del libro. Geroch, simplemente, no puede mantener el tono al llegar a la relatividad general (lo que probablemente sea una dificultad intrínseca dadas las técnicas matemáticas necesarias en esta teoría del campo gravitatorio). Y así, en esta parte la exposición es menos original, repitiéndose temas ya oídos, como los de las inefables hormigas bidimensionales.

Merece, asimismo, la pena advertir que, desgraciadamente, en ocasiones nos quedamos con la miel en los labios, como, por ejemplo, en las páginas 135-136, cuando tras una excelente descripción de las dificultades existentes para determinar si la velocidad de la luz es efectivamente 3×10^{10} cm/s, se nos dice únicamente que "es posible solventar todas [las] dificultades", pero que el "resultado es sumamente técnico" y su "descripción... un asunto bastante complicado". Uno habría esperado algo más de esfuerzo en un punto que, como éste, es crucial para la fundamentación lógica de la relatividad especial, y, por consiguiente, básico también para una importante parcela de la filosofía de la ciencia.

Asimismo, es discutible, aunque comprensible dado el interés general que rodea a este tema y al hecho de que Geroch haya dedicado sus mejores energías como investigador a estos asuntos, el que virtualmente la única aplicación de la relatividad general que se examina sea el modelo de espaciotiempo de un agujero negro. Como es bien sabido, esta teoría dispone de otros recursos, acaso menos efectistas pero más firmes también, para justificar su sólida posición dentro del conjunto de la física actual.

No obstante, por encima de sus limitaciones, este libro es uno de los pocos ejemplos existentes en física de presentación auténticamente moderna. Los interesados en temas científicos, y en particular los estudiantes de física, agradecerán su publicación en castellano. (J. M. S. R.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EL ALTRAMUZ

DESCRIPTORES DE LUPINO. International Board for Plant Genetic Resources. FAO; Roma, 1981.

AGRICULTURAL AND NUTRITIONAL ASPECTS OF LUPINES. R. Gross y E. S. Bunting en *Proceedings of the First International Lupine Workshop. Lima. Cuzco. Perú 12-21 April 1980*. Eschborn, 1982.

EL CULTIVO Y UTILIZACIÓN DEL TARWI (*L. MUTABILIS* SWEET). R. Gross en *Producción y protección vegetal, 36*. FAO; Roma, 1982.

ACTAS II CONFERENCIA INTERNACIONAL DEL LUPINO. Torremolinos. España; mayo de 1982. International Lupin Association; 1983.

PROCEEDINGS III INTERNATIONAL LUPINE CONFERENCE. La Rochelle. France. 4-8 junio 1984. International Lupin Association 1984.

IL LUPINO, UNA LEGUMINOSA ANTICA CON UN NUOVO FUTURO. C. Pompei y M. Lucisano. Consiglio Nazionale delle Ricerche. Roma, 1984.

LE LUPIN. Belteky, Kovacs, Desbrosses. Union Nationale des Producteurs de Lupin. France, 1984.

LA CELULA *T* Y SU RECEPTOR

ANTIGEN-INDUCIBLE, *H-2*-RESTRICTED, INTERLEUKIN-2-PRODUCING *T* CELL HYBRIDOMAS. LACK OF INDEPENDENT ANTIGEN AND *H-2* RECOGNITION. John W. Kappler, Barry Skidmore, Janice White y Philippa Marrack en *The Journal of Experimental Medicine*, vol. 153, n.º 5, págs. 1198-1214; 1 de mayo de 1981.

BINDING OF IMMUNOGENIC PEPTIDES TO IA HISTOCOMPATIBILITY MOLECULES. Bruce P. Babbitt, Paul M. Allen, Gary Matsueda, Edgar Haber y Emil R. Unanue en *Nature*, vol. 317, n.º 6035, págs. 359-361; 26 de septiembre de 1985.

REACCIONES QUIMIOCUANTICAS EN LA REGION DEL FRIO INTENSO

CHEMICAL REACTIONS AT VERY LOW TEMPERATURES. V. I. Goldanskii en *Annual Review of Physical Chemistry*, vol. 27, págs. 85-126; 1976.

QUANTUM MOLECULAR TUNNELING IN CHEMICAL REACTIONS. Vitalii I. Goldanskii en *Chemica Scripta*, vol. 13, n .º 1, págs. 1-9; 1979.

FACTS AND HYPOTHESES OF MOLECULAR CHEMICAL TUNNELLING. Vitalii I. Goldanskii en *Nature*, vol. 279, n.º 5709, págs. 109-115; 10 de mayo de 1979.

THE TUNNEL EFFECT IN CHEMISTRY. R. P. Bell. Chapman and Hall, Ltd., 1980.

IMAGENES SISMICAS DE LOS LIMITES DE PLACA

SEISMIC MULTICHANNEL TOWED ARRAYS IN THE EXPLORATION OF THE OCEANIC CRUST. Manik Talwani, Paul L. Stoffa, Peter Buhl, Charles Windisch y John B. Diebold en *Tectonophysics*, vol. 81, n.º 3-4, págs. 273-300; 20 de enero de 1982.

ORIGIN OF SEAWARD-DIPPING REFLECTORS IN OCEANIC CRUST OF THE NORWEGIAN MARGIN BY "SUBAERIAL SEAFLOOR SPREADING." John C. Mutter, Manik Talwani y Paul L. Stoffa en *Geology*, vol. 10, n.º 7, págs. 353-357; julio 1982.

MULTICHANNEL SEISMIC IMAGES OF THE OCEANIC CRUST'S INTERNAL STRUCTURE: EVIDENCE FOR A MAGMA CHAMBER BENEATH THE MESOZOIC MID-ATLANTIC RIDGE. John C. Mutter y Grupo de Estudios North Atlantic Transect (NAT) en *Geology*, vol. 13, n.º 9, págs. 629-632; septiembre, 1985.

EL CORAZON, GLANDULA ENDOCRINA

THE NATRIURETIC HORMONE AND ITS POSSIBLE RELATIONSHIP TO HYPERTENSION. H. E. de Wardener y G. A. MacGregor en *Hypertension: Physiopathology and Treatment*, dirigido por J. Genest, O. Kuchel, P. Hamet y M. Cantin. McGraw-Hill Book Company, 1983.

EFFECTS OF SYNTHETIC ATRIAL NATRIURETIC FACTOR ON RENAL FUNCTION AND RENIN RELEASE. John C. Burnett, Jr., Joey P. Granger y Terry J. Opgenorth en *American Journal of Physiology*, vol. 247: *Renal, Fluid and Electrolyte Physiology*, vol. 16, n.º 5, págs. F863-F866; noviembre, 1984.

THE HEART AND THE ATRIAL NATRIURETIC FACTOR. M. Cantin y J. Genest en *Endocrine Reviews*, vol. 6, n.º 2, págs. 107-127; 1985.

FILOGENIA DE LAS AVES MEDIANTE COMPARACION DE ADN

THE PHYLOGENY AND CLASSIFICATION OF BIRDS BASED ON THE DATA OF DNA-DNA HYBRIDIZATION. Charles G. Sibley y John E. Ahlquist en *Current Ornithology*, vol. 1, págs. 245-292; 1983.

THE PHYLOGENY AND CLASSIFICATION OF THE NEW WORLD SUBOSCINE PASSERINE BIRDS (PASSERIFORMES: OLIGOMYODI: TYRANNI). Charles G. Sibley y John E. Ahlquist en *Neotropical Ornithology*, dirigido por P. A. Buckley, Mercedes S. Foster, Eugene S. Morton, Robert S. Ridgely y Francine G. Buckley. American Ornithologist's Union Monograph n.º 36, 1985.

TECNICAS DE LA CANTERIA INCA

INCA ARCHITECTURE. Graziano Gasparini y Luise Margolies, traducido por Patricia J. Lyon. Indiana University Press, 1980.

INCA QUARRYING AND STONECUTTING. Jean-Pierre Protzen en *Journal of the Society of Architectural Historians*, vol. 44, n.º 2, págs. 161-182; mayo, 1985.

ASTRONOMIA ISLAMICA

DICTIONARY OF SCIENTIFIC BIOGRAPHY. Dirigido por Charles Coulston Gillespie. Charles Scribner's Sons, 1962.

THE SCIENTIFIC ENTERPRISE. A. I. Sabra en *The World of Islam: Faith, People, Culture*, dirigido por Bernard Lewis. Alfred A. Knopf, 1976.

STUDIES IN THE ISLAMIC EXACT SCIENCES. E. S. Kennedy. American University of Beirut, 1983.

JUEGOS DE ORDENADOR

CLASSIC CHESS PROBLEMS. Kenneth S. Howard. Dover Publications, Inc., 1970.

COMPUTER GAMESMANSHIP. David Levy. Simon and Schuster, 1984.

TALLER Y LABORATORIO

PARTÍCULAS SUBATÓMICAS. Steven Weinberg. Prensa Científica; Barcelona, 1986.